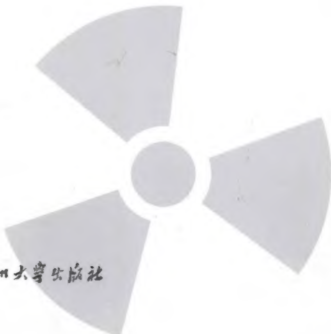
核安全系列丛书

常用放射性同位素基础知识

Changyong Fangshexing Tongweisu Jichu Zhishi

肖铮●主编



蘭州大學出版社

策划编辑/张爱民　责任编辑/佟玉梅　封面设计/刘 杰

核安全系列丛书

《常用放射性同位素基础知识》

《工业电离辐射防护与安全》

《医用电离辐射防护与安全》

《电磁辐射防护与安全》

《核技术利用法律法规汇编》

ISBN 978-7-311-03749-9

定价：22.00元

核安全系列丛书

常用放射性同位素基础知识

Changyong Fangshexing Tongweisu Jichu Zhishi

肖铮●主编

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

常用放射性同位素基础知识/肖铮主编.—兰州:兰州大学出版社,2011.11

(核安全系列丛书)

ISBN 978-7-311-03749-9

Ⅰ.①常… Ⅱ.①肖… Ⅲ.①放射性同位素—基本知识 Ⅳ.①O615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 236632 号

策划编辑 张爱民
责任编辑 佟玉梅
封面设计 刘 杰

书 名 常用放射性同位素基础知识
主 编 肖 铮
出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)
网 址 http://www.onbook.com.cn
电子信箱 press@lzu.edu.cn
印 刷 兰州奥林印刷有限责任公司
开 本 710mm×1020mm 1/16
印 张 7.25
字 数 112 千
版 次 2011 年 11 月第 1 版
印 次 2011 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-311-03749-9
定 价 22.00 元

总 序

自20世纪人类发现核能并开始利用核能作为新型能源，核能与核技术的发展突飞猛进，为人类社会的进步和文明做出了重大的贡献。核能技术应用产业，是一个以众多学科为基础发展起来的综合性战略产业，它与现代航天技术、微电子技术、生物工程等一样是当代高技术的重要领域之一，属于安全、清洁的高技术产业。20世纪80年代初，我国实行改革开放政策，核工业开始走上新的发展道路，开发核电和推广核技术应用成为核工业的重要方向。20多年来，我国核工业立足自主开发，扩大对外开放，核科学技术研究不断取得进展，核电开发与建设成就显著，核技术应用产业化初具规模。目前核技术已应用于我国国家安全、产业发展等方面，在工业、农业、医学等领域的广泛应用，创造了巨大的经济效益、社会效益与生态效益，推动了社会的进步。但在人类应用、发展核技术来造福社会的同时，不可避免地出现了一些辐射事故，这使得人们不得不考虑发展核能与核技术所带来的负面效果。人类环境是很容易受污染损害的，这又需要我们在大力应用核技术的同时，还要保障我们的社会安全稳定、环境不受污染，以求社会平稳、健康地发展。

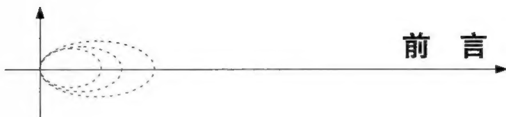
甘肃省是我国最早的核工业和核试验基地，辖区内核工业和核技术利用项目按照国家核事业发展的整体布局，起步早、发展快。目前甘肃省

核设施涉及铀矿的开采水冶系统、铀浓缩、铀转化、放射性废物的处置等行业;核技术利用涉及探伤、辐照加工、医用放射性诊疗、核仪表生产、地质勘探等业务;以镍、铅、锌、稀土和贵金属为主的矿产是甘肃省的优势资源,随着伴生放射性矿产资源的开发、利用,一些自然界的放射性污染进入人类生活的环境中;社会已进入飞速发展的信息化时代,伴有电磁辐射的设施和活动在逐步增多,甘肃省有各类伴有电磁辐射的设备(设施),涉及广播电视发射塔台、中波广播电台、卫星地球站、移动通信基站、高压输变电工程等项目,增加了辐射环境管理工作的内容,对辐射环境管理工作提出了更高的要求。

"核与辐射"作为一个人们心中比较神秘的话题,人们常常谈核色变。为了使更多读者了解并认识日常生活中所遇到的核与辐射的基础知识,了解国家法律法规在核与辐射监管与应用方面的相关要求,我们特编写了这套《核安全系列丛书》,包括《常用放射性同位素基础知识》、《工业电离辐射防护与安全》、《医用电离辐射防护与安全》、《电磁辐射防护与安全》、《核技术利用法律法规汇编》共5本。此套丛书亦适用于核技术利用单位核与辐射知识的普及,为他们提供必要的理论基础知识,为今后开展核与辐射相关工作提供便利。

武德凯

2011年10月



前 言

20世纪中叶以来，放射性同位素的应用已遍及医学、工业、农业、资源、环保、军事以及科学研究等各个领域。在很多应用场合，它要比现有可替代的技术或流程更有效、更便宜。放射性同位素技术作为一种新型技术，在各个方面的广泛应用已产生显著的社会效益和经济效益，几乎全球所有国家都在使用放射性同位素。

本书主要介绍了放射性同位素的基础知识，其中包括放射性同位素基本概念、核衰变、射线与物质相互作用、辐射探测器、放射源分类和放射性同位素的应用等，作为基础知识，一为查阅方便，二让读者对放射性同位素基础知识有基本的了解。本书对常用的25种放射性同位素作了简要介绍，力图使读者对工作中使用的放射性核素有一个较全面的了解。

本书适用于利用核技术的单位对放射性知识的普及，也可作为读者了解放射性知识的参考书籍。

由于编者学识水平有限，书中的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2011年9月

目 录

第一章　放射性同位素基本概念

一、核素

核素是指具有一定数目的质子和中子以及特定能态的一类原子核。

二、相对原子质量

相对原子质量单位，记作U(unit的缩写)。一个原子质量单位定义如下：1 U=$^{12}_{6}$C原子核质量的1/12。

三、原子序数

原子序数指原子核中质子数目，也指核电荷数。

四、同位素

同位素是质子数相同中子数不同的核素的总称。

五、能级

能级是由玻尔理论发展而来的，现代量子物理学认为原子和原子核的可能状态是不连续的，因此，各状态对应的能量也是不连续的，这些能量值就是能级。

六、特征X射线

原子发生内壳层电子激发和电离时，形成内壳层空穴，瞬时被外壳层电子填充，导致辐射发生，产生特征X射线。

七、放射性衰变

某些元素的原子核能自发地释放辐射线（光子或粒子），这一过程称为放射性衰变。

八、半衰期、衰变常数、平均寿命

半衰期：放射性活度或放射性核素数目衰减到初始值一半时所需的时间。用$T_{1/2}$表示，国际单位为秒，符号s。

衰变常数：单个原子核在单位时间内发生衰变的几率，衰变常数用λ来表示，$\lambda = \ln 2/T_{1/2} = 0.693/T_{1/2}$。

平均寿命：用来量度衰变的快慢，指原子核在衰变前平均经历的时间，简称寿命。用τ来表示，$\tau = 1/\lambda = T_{1/2}/\ln 2$。

九、本底

本底指在没有被测源存在的条件下，所有源的剂量或剂量率（或与剂量或剂量率有关的可观察测定数）。

十、天然本底

天然本底指与天然源或环境中不受控制的任何其他源有关的剂量、剂量率或放射性浓度。

十一、放射源

放射源指被永久地密封在包壳内或被严密束缚的、制成固体形式的放射性物质及其在泄漏或破裂时释放的任何放射性物质，而且这类放射性物质不能被免除监管控制，但它不包括为处置目的而封装的放射性物质或研究堆和动力堆核燃料循环中的核材料。

十二、失控源

失控源指未被置于监管控制之下的放射源。它或是从未接受过监管机构控制，或是因遗弃、丢失、错放、被盗或未经授权的擅自转移而失去控制。

十三、电离

电离指从一个原子、分子或其他束缚状态释放一个或多个电子的过程。

十四、电离辐射

电离辐射指由能通过初级过程或次级过程引起电离的带电粒子或不带电粒子组成的，或者由它们两者混合组成的辐射。有时也将电离辐射简称为辐射。

十五、放射性活度

1.放射性活度

在给定的时刻处于一给定能态的一定量的某种放射性核素的活度A定义为：$A=dN/dt$。

式中，dN为在时间间隔内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。单位为秒$^{-1}$，符号为s^{-1}。专用名为贝可，符号Bq。已废除的非法定专用单位为居里(Ci)，1 Ci=3.7×10^{10} Bq。

如果一个放射源初始A_0，在t时刻放射性活度为$A(t)$，放射源核素的衰变常数为λ，则这个放射源的放射性活度$A(t)=A_0e^{-\lambda t}$。

2.质量放射性活度

质量放射性活度又称比活度，指单位质量的某种物质的放射性活度。单位为贝可/千克，符号为Bq/kg。

十六、照射量

照射量是射线在单位质量空气中，释放出的全部电子被空气阻止时，在空气中产生一种符号(正或负)的离子总电荷量的绝对值，单位为“库/千克”(C/kg)。

十七、吸收剂量

吸收剂量表示单位质量受照物质所吸收的辐射能量值大小，吸收剂量的国际制单位为焦/千克(J/kg)，又称为戈(Gy)。

十八、等效剂量

人体组织的吸收剂量D乘以入射辐射的品质因数Q，即等效剂量。$H_T=DQN$，N是修正因数，一般为1。不同种类的辐射，虽使人体组织有相同的吸收剂量，但会造成不同的生物伤害程度。辐射的品质因数Q代表辐射伤害程度。

十九、有效等效剂量

有效等效剂量指人体受照射后，各器官或组织平均等效剂量与其加权因数乘积之和，$H_E=\sum W_tH_t$，单位为希(Sv)。人体不同器官组织接受辐射剂量后，对生命损害的贡献度不同，组织加权因数W_t代表这个贡献度。W_t值越大，造成生命损害的几率也越大。

二十、比释动能

间接电离粒子与物质相互作用时,在单位质量的物质中产生的带电粒子的初始动能的总和称为比释动能。严格定义为:比释动能K是dE_{tr}除以dm而得的商,即$K=dE_{tr}/dm$。

式中,dE_{tr}为间接电离粒子在特定物质的体积元内释放出来的所有带电粒子的初始动能的总和(包括这些带电粒子在韧致辐射中放出的能量,以及在这一体积元内发生的次级过程中产生的任何带电粒子的能量,也包括俄歇电子的能量在内)。单位为焦(J)。dm为所考虑的体积元内物质的质量。单位为千克(kg)。

比释动能的国际单位为戈(Gy)。例如,物质中某点的比释动能为1 Gy,表示由间接致电离粒子在这一点处,单位质量的指定物质(如处在空气中的小块组织)中,传递给直接致电离粒子(如电子)的初始动能为1 J/kg。

它的专用单位与吸收剂量单位相同。

二十一、比释动能率

在单位时间内单位质量的特定物质中,由间接电离粒子释放出来的所有带电粒子初始动能的总和称为比释动能率。比释动能率$\dot{K}$定义为dK除以dt,即$\dot{K}=dK/dt$。

式中,dK是比释动能在时间间隔dt内的增量。比释动能率的SI单位是戈或其倍数或其分倍数除以适当的时间单位而得的商,如Gy/s、Gy/h、mGy/h等。

它的专用单位与吸收剂量率单位相同。

二十二、确定性效应

辐射引起的电离可能使原子和分子发生变化,从而损伤细胞。如果发生了细胞损伤而且没有充分地修复,则可能有碍于细胞的存活或再生,或者可能导致产生一个可以存活的但被改变了的细胞。这两种不同结果对作为一个整体的有机体具有不同的影响。人体的大多数器官和组织甚至不会因损失了显著数量的细胞而受到影响,但若损失的细胞足够多,则将会出现所谓的组织损失和随之发生的组织功能丧失的可观察到的损害。在低剂量情况下,导致这样的损害的可能性为零,但若高于某个阈剂量水平,损害肯定会发生,剂量大于阈剂量,则损害的严重程度随剂量的增加而增大,这类结果称为确定性

效应。

二十三、随机性效应

如果受到辐照的细胞被改变而不是被杀死，则结果会有重大区别。尽管肌体存在高度有效的防御机制，有一个被改变的但存在活细胞的再生过程产生的一些克隆细胞，在经过长期时间的和不等同的延迟之后，即经过所谓的潜伏期之后，会出现癌。癌的此种诱发被假设在无阈值的全部剂量范围内发生，而且诱发的几率被认为是与所接受的剂量成正比，这就是所谓的“线性无阈”假设。因此，癌症的发生率随剂量的增加而增大，但任何癌的严重程度与导致癌产生的剂量无关，这种效应称为随机性效应。

二十四、遗传效应

如果辐照引起的损伤发生在一个功能是向后代传递遗传信息的细胞中，推测某些损害可能在受照人员的后代身上表现出来，而且这些损害可以呈现许多不同类型和不同严重程度，则这种类型的随机性结果称为遗传效应。

二十五、无损探伤

无损探伤是在不损坏工件或原材料工作状态的前提下，对被检验部件的表面和内部质量进行检查的一种测试手段。常用的无损探伤方法有：X射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、渗透探伤、涡流探伤、γ射线探伤、萤光探伤、着色探伤等方法。

二十六、射线探伤

射线探伤是用X射线或γ射线对金属部件及其焊缝进行摄片检查以判断部件的铸造或焊接的质量。射线探伤按所用射线的不同，分为X射线探伤和γ射线探伤。

第二章　核衰变及其探测

第一节　核衰变概述

一、核衰变

核衰变是原子核自发射出某种粒子而变为另一种核的过程，是认识原子核的重要途径之一。

1896年法国科学家A. H. 贝可勒尔研究含铀矿物质的荧光现象时，偶然发现铀盐能放射出穿透力很强可使照片底片感光的不可见射线。不久人们发现其他原子序数很高的重元素如钍、镭等的盐类也具有放射性。经过多年细致研究，弄清楚这种放射性是铀、钍、镭等原子核的性质，与环境温度以及所处的化学状态无关。

二、3种射线

(1)α射线，具有最强的电离作用，穿透本领很小，在云室中留下粗而短的径迹。

(2)β射线，电离作用较弱，穿透本领较强，云室中的径迹细而长。

(3)γ射线，电离作用最弱，穿透本领最强，云室中不留痕迹。

进一步研究表明，α射线中放射的粒子是电荷数为2、质量数为4的氦核^4He，β射线中放射的粒子是高速电子流，γ射线是波长很短的电磁波。不稳定的放射性核放射出射线后衰变为另一种核或衰变为能量较低的核，放射过程中遵从电荷守恒、质量数守恒和能量守恒。

除了天然存在的放射性核素以外，还存在大量人工制造的其他放射性核素。放射性粒子的类型除了放射α、β、γ粒子以外，还有放射质子、中子、中微子

等粒子以及自发裂变、β缓发粒子等。

(一)α衰变

α衰变(图2-1),是一种放射性衰变(核衰变)。发生α衰变时,一颗α粒子会从原子核中射出(α粒子是氦核He^{2+},即一颗由2个质子和2个中子组成的原子核);α衰变发生后,原子核的质量数会减少4个单位,其原子序数也会减少2个单位。

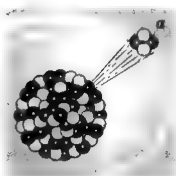


图2-1 α衰变

(二)β衰变

β衰变(图2-2)是放射性原子核放射电子(β粒子)和中微子而转变为另一种核的过程。

β衰变又分β^-衰变、β^+衰变和轨道电子俘获3种方式。

1. β^-衰变

放射出β^-粒子(高速电子)的衰变。一般地,中子相对丰富的放射性核素常发生β^-衰变。这可看做母核中的一个中子转变成一个质子的过程。

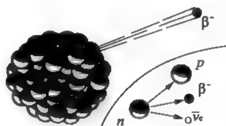


图2-2 β衰变

2. β^+衰变

放射出β^+粒子(正电子)的衰变。一般地,中子相对缺乏的放射性核素常发生β^+衰变,这可看做母核中的一个质子转变成一个中子的过程。

3. 轨道电子俘获

原子核俘获一个K层或L层电子而衰变成核电荷数减少1、质量数不变的另一种原子核。由于K层最靠近核,所以K俘获最易发生。在K俘获发生时,必有外层电子去填补内层上的空位,并放射出具有子体特征的标志X射线。这一能量也可能传递给更外层电子,使它成为自由电子发射出去,这个电子称俄歇电子。

(三)γ衰变和内转换

1. γ衰变

处于激发态的核,通过放射出γ射线而跃迁到基态或较低能态的现象。γ衰变是放射性元素衰变的一种形式,衰变时放出γ射线(是电磁波的一种)。γ射线

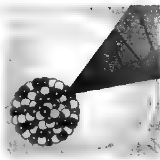


图 2-3 内转换

的穿透力很强，在医学核物理技术等应用领域占有重要地位。

2.内转换

内转换(图2-3)有时处于激发态的核可以不辐射γ射线回到基态或较低能态，而是将能量直接传给一个核外电子(主要是K层电子)，使该电子电离出去。这种现象称为内转换，所放出的电子称内转换电子。

第二节 射线与物质相互作用

一、带电粒子与物质的相互作用

带电粒子与物质相互作用的过程是复杂的，主要过程有电离和激发，弹性散射和韧致辐射。其他过程有湮没辐射、契伦科夫辐射、核反应以及引起物质化学变化等。

带电粒子主要通过电离和激发过程损失能量，其次是通过韧致辐射。这两种过程构成了带电粒子碰撞过程中的能量损失。

(一)电离和激发

当具有一定动能的带电粒子与原子的轨道电子发生库仑作用时，把本身的部分能量传递给轨道电子。如果轨道电子获得的动能足以克服原子核的束缚，使轨道电子逃出原子壳层而成为自由电子，则此过程为电离。

电离后的原子带正电荷，它与逃出的自由电子合称为离子对。如果轨道电子获得的能量不足以摆脱原子核的束缚，而是从低能级跃迁到高能级，使原子处于激发态，则此过程为激发。

带电粒子在电离和激发过程中的能量损失，是通过带电粒子和轨道电子的库仑碰撞产生的，这称为碰撞过程的能量损失或电离损失。

(二)韧致辐射

当高速运动的带电粒子从原子核附近掠过时，它会受到原子核库仑场的作用而产生加速度。由经典电动力学知道，在受到减速或加速的带电粒子时，其

部分或全部动能将变为连续谱的电磁辐射，这就是轫致辐射。这种形式的能量损失称为辐射损失。

(三)弹性散射

当带电粒子与原子核库仑场相互作用时，其运动方向发生改变，而作用前后体系的动能与动量守恒，此过程称为弹性散射。

(四)湮没辐射和契伦科夫辐射

一个粒子与其相应的反粒子发生碰撞时，其质量可能转化为γ辐射，这种辐射称为湮没辐射。湮没辐射与两个碰撞粒子之间遵循质量守恒和能量守恒定律。

当高速带电粒子束在透明介质中以高于光在该介质中的传播速度运动时，带电粒子的部分能量以电磁辐射的形式辐射出来，此种形式的辐射称为契伦科夫辐射。

(五)带电粒子在物质中的射程

带电粒子在与物质相互作用的过程中，逐渐耗尽其动能，最后阻留在物质中被物质吸收。带电粒子在某种物质中沿着入射方向从进入到最后被物质吸收所经过的最大直线距离，称为带电粒子在该物质中的射程。射程的大小与粒子的种类、初始能量及吸收物质的性质有关。

二、X射线和γ射线与物质的相互作用

X射线、γ射线是比紫外线的波长短得多的电磁波，它与物质相互作用时，能产生次级带电粒子(主要是电子)和次级光子，通过这些次级带电粒子的电离、激发过程把能量传递给物质。

(一)光电效应

能量为$h\nu$的光子通过物质时，与原子的某壳层中的一个轨道电子相互作用，把全部能量传递给这个电子，获得能量的电子摆脱原子核的束缚成为自由电子(常称为光电子)，此效应称为光电效应。

(二)康普顿效应

当具有能量为$h\nu$的光子与原子内一个弱束缚电子相互作用时，光子交给电子部分能量后，其频率发生改变并与入射方向成θ角散射(康普顿散射光子)，获得足够能量的电子与光子入射方向成φ角方向射出(康普顿反冲电子)，此种

效应称为康普顿效应。

(三)电子对效应

在原子核场或原子的电子场中，一个光子转化成一对正、负电子，这就是电子对效应。

三、中子与物质的相互作用

中子按能量可划分为：

超冷中子　E_n=10^{-7} eV–10^{-4} eV

冷中子　E_n=10^{-4} eV–10^{-3} eV

热中子　E_n=10^{-3} eV–100 eV

超热中子　E_n=100 eV–10^{4} eV

快中子　E_n=10^{4} eV–10^{7} eV

高能中子　E_n>10^{7} eV

中子按能量的划分并不严格，各文献之间略有差别。

中子不带电，几乎不能和原子的电子相互作用，而只能和原子核相互作用。中子与原子核相互作用分为两大类：一类是散射，包括弹性散射和非弹性散射；另一类是吸收，即中子被原子核吸收后，产生其他种类的次级粒子。快中子减速成为能量较低的中子的过程称为中子的慢化。中子一般只有被慢化后才能有效地被物质吸收。

(一)弹性散射

弹性散射分为势散射和复合核散射两种。势散射是中子受核力场作用而发生的散射。中子未进入核内，而是发生在核的外表面。复合核弹性散射是中子进入核内形成复合核，而后放出中子。弹性散射又称为(n,n)反应。

(二)非弹性散射

非弹性散射分为直接相互作用过程和形成复合核过程。直接相互作用过程是入射中子和靶核的核子发生非常短时间(约10^{-22}~10^{-21} s)的相互作用，在每次直接相互作用过程中，中子损失的能量较小。复合核过程是入射中子进入靶核形成复合核，在形成复合核的过程中，入射中子和核子发生较长时间(约10^{-20}~10^{-15} s)的能量交换。无论经过哪种过程，靶核都将放出一个动能较低的中子而处于激发态，然后这种靶核以发射一个或若干个光子的形式释放出激发能后回到基态。

（三）辐射俘获

中子射入靶核后，与靶核形成激发态的复合核，然后复合核通过发射一个或几个γ光子而回到基态，不再发射其他粒子，此过程叫辐射俘获，也称为(n，γ)反应。这时中子被靶核吸收。

（四）其他核反应

不同能量的中子和靶核发生的核反应是多种多样的，除上述(n，n)、(n，γ)反应外还有发射带电粒子核反应、裂变反应、多粒子发射核反应等。

第三节　辐射探测器

放射性同位素发出的射线与物质相互作用，会直接或间接地产生电离和激发等效应，利用这些效应，可以探测放射性的存在、放射性同位素的性质和强度。用来记录各种射线的数目、测量射线强度、分析射线能量的仪器统称为探测器。

一般将探测器分为两大类，一是“径迹型”探测器，如照相乳胶、云室、气泡室、火花室、电介质粒子探测器和光色探测器等，它们主要用于高能粒子物理研究领域。二是“信号型”探测器，包括电离计数器、正比计数器、盖革计数管、闪烁计数器、半导体计数器和契伦科夫计数器等，这些信号型探测器在低能核物理、辐射化学、生物学、生物化学和分子生物学以及地质学等领域越来越得到广泛应用。

利用辐射在气体、液体或固体中引起的电离、激发效应及其他物理、化学变化进行核辐射探测的器件称为辐射探测器。

一、辐射探测的基本过程

(1)辐射粒子射入探测器的灵敏体积。

(2)入射粒子通过电离、激发或核反应等过程在探测器中沉积能量。

(3)探测器通过各种机制将沉积能量转换成某种形式的输出信号。

二、探测器分类

按其探测介质类型及作用机制主要分为气体探测器、闪烁探测器和半导体探测器3种。

(一)气体探测器

以气体为工作介质,由入射粒子在介质中产生的电离效应或核反应引起输出信号的探测器。

入射带电粒子通过气体时,由于与气体分子中轨道电子的库仑作用而逐次损失能量,最后被阻止下来;同时使气体分子电离或激发,并在粒子通过的径迹上生成大量的由电子和正离子组成的离子对和激发分子。

入射粒子直接产生的离子对称为初电离,初电离产生的高速电子(称电子)足以使气体产生的电离称为次电离,两者总合称为总电离。带电粒子在气体中产生一离子对所需的平均能量W_i称为电离能。对于不同的气体,W_i大约在30 eV上下。

气体探测器的典型圆柱形结构如图2-4所示,在中央阳极和外壳阴极加上正电压。沿入射粒子径迹产生的电子—离子对在外电场的作用下产生定向漂移,引起电极上发生感应电荷的变化;与此同时,在外回路上流过电流信号,或流过负载电阻产生输出电压信号。

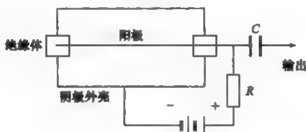


图2-4 气体探测器的结构

当在两电极上所加电压不同时,就造成气体探测器的不同工作状态。当外加工作电压过低时,电子—离子对由于互相碰撞而发生复合,称为复合区,复合的程度与外加电压和离子对数的密度有关,一般不作为气体探测器的工作区域。

当外加工作电压较高时,电子与正离子的复合可以忽略而进入饱和区,这时,产生的离子对数正比于入射粒子在灵敏体积损失的能量,工作于这种工作状态的探测器就是电离室。

随着工作电压的升高,在中央阳极附近很小的区域内,电场强度足够强,发生气体放大或雪崩过程。在一定的工作电压下,气体放大倍数是一定的。此时,

形成的总离子对数仍正比于人射粒子能量，相应的工作区域成为正比区。正比计数器就工作于这一区域。

工作电压进一步提高就进入有限正比区，在探测器的灵敏体积内，积累了相当的由正离子组成的“空间电荷”。气体放大倍数在一定工作电压下不再保持常数，初电离小的人射粒子的可能会大一点，称为有限正比区。一般没有探测器工作于这一区域。

随着工作电压的进一步提高，雪崩过程很快传播到整个阳极，而且雪崩过程形成的正离子紧紧地包围了阳极丝，称为正离子鞘。由于正离子鞘的电荷极性与阳极电荷相同而起到电场减弱作用，当正离子鞘的总电荷量达到一定时，雪崩过程终止。因此，最后的总离子对数与初电离无关。这时，人射粒子仅仅起到一个触发作用，输出脉冲信号的大小与人射粒子的类型和能量均无关，这就是G-M区，仅作为一个计数器用。

上述过程可以用图形象地表示，图2-5中纵坐标为产生离子对数，横坐标为外加电压。其中I为复合区，Ⅱ为饱和区，Ⅲ为正比区，Ⅳ为有限正比区；Ⅴ为G-M区。这条曲线揭示了气体探测器中由量变到质变的规律。

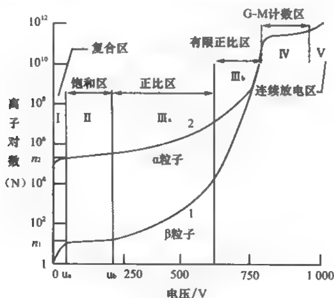


图2-5　气体探测器由量变到质变的曲线图

(二)闪烁探测器

闪烁探测器一般由闪烁体和光电倍增管组成。

1.闪烁体

闪烁体是一种发光器件，当入射带电粒子使探测介质的原子电离激发而退激时,可发出可见光光子,称为荧光光子,这种光的强度用肉眼是看不见的,必须借助高灵敏的光电倍增管(PMT)才能探测到这些光信号。PMT的光阴极将收集到的荧光光子转变为光电子，光电子通过聚焦被光电倍增管的第一联极收集,并在其后的联极倍增形成一个相当大的脉冲电子流,在输出回路上形成输出信号。

比较理想的闪烁体应具有以下的性质：

(1)将带电粒子动能转变成荧光光子的效率高,即高的发光效率。

(2)入射带电粒子损耗的能量与产生的荧光光子数具有良好的线性关系。

(3)闪烁体介质对自身发射的光是透明的,即其发射谱与吸收谱不应该有明显的重叠。

(4)入射粒子产生的闪光持续时间,即闪烁体的发光衰减时间要尽量短,以便产生快的输出信号,获得好的时间响应。

(5)合适的折射率和良好的加工性能。

现在使用频率较高的闪烁体有两大类:一类是无机闪烁体,如NaI(Tl),这些材料的密度大,原子序数高,适合于探测射线和较高能量的射线;另一类为有机闪烁体,如塑料和有机液体闪烁体,主要用于β粒子和中子的探测。

2.光电倍增管

光电倍增管(PMT)是一种光电器件,主要由光阴极、聚焦极、打拿极(联极)和阳极组成,封于玻璃壳内并带有各电极引出。光电倍增管的产品很多,在选择时主要要注意它的光阴极的光谱响应与闪烁体的发射光谱相匹配,具有较高的阴极灵敏度和阳极灵敏度、较低的暗电流或噪声脉冲、良好的工艺和稳定性。

(三)半导体探测器

半导体探测器的探测介质是半导体材料。人射带电粒子在探测介质内通过电离损失能量的同时,在探测介质内形成电子—空穴对。在电子—空穴对向电极定向漂移的过程中,在输出回路上形成输出信号。

为保证电离生成的电子—空穴对能被有效地收集，必须选用那些载流子(电子或空穴)在半导体材料中寿命长的材料，以使载流子在探测介质中的漂移长度大于结区的宽度，因此，性能优异的半导体硅和锗就成为理想的半导体探测器的介质材料。

在半导体材料中，形成一个电子—空穴对所需的能量仅为3 eV，而气体探测器中形成一个电子—离子对所需的能量为30 eV，对闪烁探测器而言，形成一个光电倍增管第一打拿极的光电子则需300 eV。与气体探测器和闪烁探测器相比，半导体探测器可获得最好的能量分辨率。

第三章　放射性同位素的生产

第一节　反应堆生产放射性同位素

反应堆是最强的中子源，其中子注量率可达10^{12}~10^{16} cm^{-2}/s。利用中子轰击不同的靶核，可以大量生产多种放射性核素。

反应堆生产放射性核素有许多优点：可同时辐照多种样品，可辐照的样品量大，靶子制备容易，辐照操作简便，成本低廉等。因此，它是制备人工放射性核素最重要的方法。

反应堆生产放射性核素的第二种方法是借助裂变过程本身，因为绝大多数裂变产物是放射性的，它们包括一个很大的原子序数范围的放射性核素，通过分离可以获得比活度很高的裂变放射性核素。

利用反应堆还可以生产某些母体核素，制成放射性核素发生器，从发生器来制取子体放射性核素。

一、简史

反应堆放射性核素的研究、试制、生产，是美国于1942年建成世界上第一座反应堆后最先开展起来的。当时正值第二次世界大战，这方面的科研、试制和生产也都服从于军事核计划的需要，直至战后才开始转向民用。世界上第一份"放射性同位素产品目录"是美国曼哈顿计划总部于1946年6月发表的；第一份反应堆放射性同位素商品是由美国橡树岭国家实验室发出的碳-14(其化学形式是$Ba^{14}CO_3$)，其活度为3.7×10^7 Bq。从此开始了反应堆放射性核素的大量生产。中国在1958年由原子能研究所首次利用反应堆制备出钴-60等33种放射性核素，并于1959年起开始批量生产。

二、生产方法

反应堆放射性核素是将含有有关原子核的适当对象放入反应堆活性区，利用高注量中子来轰击(或叫辐照)，使有关原子核发生核反应而产生的。被轰击的对象称为靶子，做靶子的材料叫做靶材料，靶材料的有关元素及其有关原子核称为靶元素和靶核。由于中子是电中性的，不受原子核库仑势垒的影响，它很容易进入被轰击的靶核而实现核反应，使该靶核转变为所需的放射性核素。

中子辐照靶核引起的核反应很多，但在反应堆中子的能量条件下，对生产放射性核素有意义的主要有下列几种核反应。

1.(n,γ)反应

(n,γ)反应是最常用的核反应，例如可以利用$^{59}Co(n,\gamma)\longrightarrow{}^{60}Co$来生产钴-60。这类核反应生成的放射性核素与靶核的原子序数相同，很难分离，其比活度一般较低，但这对大多数应用并无影响。采用富集靶核的靶材料做靶子去辐照，或利用齐拉特—查尔默斯效应在辐照中进行放射性核素的富集，可以提高其比活度。

2.(n,γ)后跟衰变反应

有些由(n,γ) 反应生成的放射性核素能很快地经过β^-等衰变得到一种与靶核的原子序数不同的放射性核素，因而可以分离得到无载体的产品。

3.(n,p)反应和(n,α)反应

在反应堆中，只有原子序数小的一些核素可能发生这些核反应。由于原子序数发生了变化，也可以分离得到无载体的放射性核素，例如利用$^{35}Cl(n,p)\longrightarrow{}^{35}S$来生产硫-35，利用$^{6}Li(n,\alpha)\longrightarrow{}^{3}H$来生产氚。

4.(n,f)反应

铀-235受到慢中子轰击能裂变。用铀-235做靶子，在反应堆中作短时间辐照，就可得到几种很有用的短半衰期的核素，例如利用(n,f)反应来生产钼-99并可同时得到氙-133等几种放射性核素。这和核燃料后处理工厂回收一些长半衰期的裂变产物——放射性核素的情况是不同的。

5.次级核反应

次级核反应是利用第一级核反应得到的、具有一定能量的粒子或反冲核来轰击另外一种靶核所发生的核反应。次级核反应同样可以用于生产放射性核素，例如用碳酸锂做靶子，用$^{6}Li(n,\alpha)\longrightarrow{}^{3}H$核反应得到的2.7 MeV的氚去轰击

同一靶材料中的氧-16，通过核反应$^{16}O(^3H,n) \longrightarrow ^{18}F$来生产氟-18。

三、产额

根据反应堆内辐照生产放射性核素产额的理论计算，可以指导放射性核素的生产实践。照射条件确定后，为了制备一定活度和比活度的某种放射性核素，通过计算可以大概知道需要照射的时间以及所需要的靶材料数量。理论计算还能帮助我们选择合适的辐照条件，减少放射性杂质的生成。

放射性核素的产额虽与生成它的核反应截面$\sigma(cm^2)$、有关靶核数目N_0、中子注量率$\varphi(cm^{-2}/s)$成正比，但与辐照时间t(s)的关系是非线性的，因为辐照过程中，既有所需要的放射性核素的生成，又有该核素的衰变。衰变因子为$e^{-\lambda t}$或$\exp(-0.693t/T_{1/2})$，λ是衰变常数(s^{-1})，$T_{1/2}$是半衰期(s)。

假定N_0在辐照过程中恒定，又无其他因素影响，一种放射性核素的产量A_t(贝可)与σ、N_0、φ、t等的关系式在最简单的情况下为：

$$A_t=N_0\,\sigma\,\varphi[1-\exp(-0.693t/T_{1/2})]$$

如果以$6.023\times10^{23}\theta/M$代替$N_0$（$\theta$为靶核的天然丰度或富集度；$M$为靶元素的摩尔质量，单位为g/mol)，则该放射性核素的产额Y(Bq/g)为：

$$Y=6.023\times10^{23}\,\theta\,\sigma\,\varphi[1-\exp(-0.693\,t/T_{1/2})]/M$$

由此关系式可见，辐照时间长些，产额就高些。但随着辐照时间的增长，产额的增长逐渐减慢，直至达到其饱和值。另外，靶材料总不是绝对纯的，增长辐照时间会使半衰期较长的放射性杂质的量增加。因此，为了能经济地生产核纯度高的放射性核素，有必要选择适宜的辐照时间。通常，对于半衰期较短的放射性核素，选5个半衰期；对于半衰期为1周至数月的，选1~3个半衰期；对于半衰期很长的，只选择相对于其半衰期较短或很短的辐照时间。

靶核的核反应截面很大时，靶的外层对内层的屏蔽作用(称自屏蔽)，使进入靶中心部分的中子注量率比表面的小或小得很多，总的产额也就相应减小。此外，反应堆本身的参数和工作情况总会发生某些变化，堆内同时辐照的靶子的种类和数量可能都不相同，位置也不固定。这些都会使中子注量率有所波动和分布不均，从而影响产额和产额计算。对于自屏蔽的影响和靶子间存在的中子降抑的影响，一般可以通过改进制靶技术和合理安排靶子在堆内的位置来改善。靶子实际接受的中子注量率，常用监测器(激活片)来监测。

四、分离、纯化和再加工

靶子受辐照后，所需的放射性核素已在其中生成。对于可以而且需要从靶材料中分离出来的放射性核素，要进行分离、纯化；对于与靶核原子序数相同而难于分离的，就不必进行这步工作。但是不管哪种情况，为了适应多种多样的需求，还须进行再加工，制成各种各样的产品，如制成普通放化制剂、医用放射性核素制剂(包括放射性药物)、放射性标记化合物、放射源以及放射性同位素仪器仪表所用的部件等。

第二节 加速器生产放射性同位素

反应堆生产放射性同位素的品种受到核反应类型的限制，因此，利用加速器生产放射性同位素，特别是缺中子同位素方面愈益显示其重要性。在国际上已被确定为临床应用的放射性同位素中，加速器生产的有40多种，反应堆生产的有25种，足见加速器在医用同位素生产中的应用。

一、基本原理

产生的具有一定能量的带电粒子，如质子、氘核和α粒子轰击靶料，通过(p,n)、(d,n)、(d,2n)、(d,α)、(d,p)和(α,n)等反应得到放射性同位素。例如用CS-30型回旋加速器产生的26 MeV质子轰击锌靶，由$^{68}Zn(p,2n)\longrightarrow{}^{67}Ga$反应得到放射性同位素$^{67}Ga$。加速器生产的常用放射性同位素列于表3-1。

表3-1 加速器生产的常用医用放射性同位素

核素	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{18}F	^{67}Ga	^{111}In	^{123}I	^{201}Tl
半衰期	20.4 min	9.96 min	122 s	110 min	78.3 h	2.81 d	13.0 h	73.5 h
射线	β^+	β^+	β^+	β^+	EC	EC	EC	EC

二、加速器生产放射性同位素的特点

加速器生产放射性同位素与反应堆生产的放射性同位素相比，具有以下特点：

(1)反应堆中主要用(n,γ)反应生产同位素，所生成的同位素与靶材料一般

是同一元素。加速器用(p,n)、(d,n)、(α,n)等反应生产同位素,所生产的放射性同位素与靶材料元素一般不相同,因此很容易分离,可进行无载体同位素的生产,可以获得高纯度、高比度放射性的同位素。

(2)加速器生产的同位素都是缺中子同位素,衰变时大多是电子俘获或发射正电子,不发射其他粒子,所以可用γ相机或正电子发射计算机断层扫描进行医学诊断,病人所受的剂量较小。

(3)构成生物机体的主要元素C、N、O的(n,γ)反应截面很小,用反应堆不能有效地生产临床诊断上很需要的这类同位素,而用小型回旋加速器很容易制备^{11}C、^{13}N、^{15}O等短寿命同位素,使用很方便。

(4)加速器操作简单,可以随时启动或停机,工作安全,检查检修方便,工作中放射性污染的危险性小。

加速器生产放射性同位素的产额决定于加速器加速粒子能量和束流强度、靶材的靶量和丰度、生成核素的核反应截面、打靶时间和生成核素的半衰期等。选择生产放射性同位素用的加速器时,其主要指标如能量和束流强度,应根据实际需要、投资经费和经济效益等多方面因素考虑。

第三节　放射性同位素发生器

放射性同位素发生器通常是一种能从较长半衰期的母体放射性核素中分离出由它衰变的短半衰期子体放射性核素的一种装置。通常是根据母子体核素在某种吸附剂(或离子交换树脂)上的分配比的明显差异而制成的一种色层柱。每隔一定时间可从柱中分离出可供医学上使用的有价值的短半衰期子体放射性核素,犹如从母牛身上挤奶,故亦称“核素母牛”。具有结构简单、操作方便、运输便利以及核性能好的优点,在临床上用于体内疾病诊断和生理功能的动态研究。

一、放射性同位素发生器简史

放射性同位素发生器最早始于医学,1920年G.法伊拉由^{226}Ra分离出^{222}Rn,从而提出发生器的概念。1951年美国布鲁克黑文国立实验室M. W. 格林等人基于法伊拉从^{226}Ra分离^{222}Rn的原理,研制成世界上第一个人工放射性同位素发生器^{132}Te–^{132}I发生器。以后^{99}Mo–^{99m}Tc、^{113}Sn–^{113m}In等发生器陆续研制成功。理

论上，应该有大批的这类母子体核素可供利用。为了发展更多的放射性同位素发生器，科学家曾进行了大量的工作，美国的M. 布鲁斯研究了5年，于1965年发表文章，列出了118个可能有用的母子体系。现在国际上实际应用的和研制的放射性同位素发生器有^{28}Mg–^{28}Al、^{38}S–^{38}Cl、^{42}Ar–^{42}K、^{44}Ti–^{44}Sc、^{47}Ca–^{47}Sc、^{68}Ge–^{68}Ga、^{72}Se–^{72}As、^{81}Rb–^{81m}Kr、^{83}Rb–^{83m}Kr、^{87}Y–^{87m}Sr、^{90}Sr–^{90}Y、^{99}Mo–^{99m}Tc、^{103}Pd–^{103m}Rh、^{103}Ru–^{103m}Rh、^{111}Ag–^{111m}Cd、^{113}Sn–^{113m}In、^{125}Sb–^{125m}Te、^{131}Ba–^{131}Cs、^{132}Te–^{132}I、^{137}Cs–^{137m}Ba、^{188}W–^{188}Re、^{189}Ir–^{189m}Os、^{194}Hg–^{194}Au等。这些母体核素中，有的是加速器生产的，有的来自裂变产物，反应堆可生产的有^{28}Mg、^{42}Ar、^{47}Ca、^{99}Mo、^{103}Pd、^{103}Ru、^{113}Sn、^{131}Ba、^{188}W等。

二、放射性同位素发生器的构造

放射性同位素发生器的构造，随母体和子体核素分离方法的不同而不同。分离方法是根据有利于母子体核素的分离和对子体核素纯度等的要求来选择的。通常要求分离效果好、效率高、速度快、操作简便，在多次重复的条件下分离得到的子体核素仍然具有较高的核纯度、放化纯度和放射性浓度以及适用的化学状态和稳定的化学组成。可用的分离方法有离子色谱法、溶剂萃取法和升华法等，常用的是离子色谱法。供医用时，为了使用方便，除基本部件外，常附加子体核素溶液接收瓶和一定量的淋洗剂。吸附柱及淋洗系统需经消毒灭菌，而且为了在使用期间其洗脱液达到医用注射液要求，还须另外附加无菌过滤器。

三、放射性同位素发生器母体核素的选择

通常根据所要求的子体核素性质，如射线类型、能量、半衰期及其他有关要求来选定母体核素。母体核素除了能衰变生成合用的子体核素和化学性质上便于子体核素的分离外，还应具有适当长的半衰期，易于大量获得，而且价格低廉。例如医学上要求有半衰期为几小时、主要γ射线能量为100~250 keV的短半衰期核素来作脏器显像、医学诊断。为此，人们选择的母体核素之一是^{99}Mo，其根据就是^{99}Mo的子体核素^{99m}Tc在生物化学、药物学性质上适合医用，在核性质上又十分理想。^{99m}Tc发射141 keV的单能γ射线，半衰期为6.0 h，几乎无β^-射线，它的子体^{99}Tc的半衰期长达2.1×10^5年，几乎可视为稳定核素，^{99}Mo和^{99m}Tc化学性质的差异也易于进行分离。母体^{99}Mo不仅半衰期为66.0 h，有利于远程运

输，而且可以在反应堆中通过 ^{98}Mo的(n,γ)核反应或^{235}U的(n,f)核反应大量生产，价格便宜。

四、放射性同位素发生器的应用

放射性同位素发生器可以为人们多次地、安全方便地提供核纯、无载体、高比活度和高放射性浓度的短半衰期核素，所以它在医学、工业、科研等领域中应用得相当多。从放射性同位素发生器中取得的短半衰期核素，可以直接应用或者制成多种多样的标记化合物(包括药物)来应用。由于短半衰期核素的应用是医学检查诊断的一个方向，所以放射性同位素发生器在医学上用得最多，除了已有的医用放射性同位素发生器^{132}Te–^{132}I、^{99}Mo–^{99m}Tc、^{113}Sn–^{113m}In、^{87}Y–^{87m}Sr、^{68}Ge–^{68}Ga之外，还需要一些新的、半衰期更短的超短寿命的放射性同位素发生器。在已有的放射性同位素发生器中用得最多的是^{99}Mo–^{99m}Tc发生器。用^{99}Mo–^{99m}Tc发生器的洗脱液^{99m}Tc高锝酸盐或用^{99m}Tc高锝酸盐为原料标记的各种含^{99m}Tc药物，已广泛用于脑、甲状腺、涎腺、肺、心、血池、肝、胆、脾、肾、骨、骨髓等的扫描显像和功能检查。^{99m}Tc的用量相当大，其用量已占医学诊断用放射性同位素总用量的80%以上。

目前已有下列7种发生器用于临床：

(1)^{68}Ge–^{68}Ga，母体半衰期387d，子体半衰期68分钟，子体γ辐射的主要能量0.511 MeV；

(2)^{81}Rb–^{81m}Kr，母体半衰期4.7 h，子体半衰期13 s，子体γ辐射的主要能量0.1904 MeV；

(3)^{87}Y–^{87m}Sr，母体半衰期3.3 d，子体半衰期2.8 h，子体γ辐射的主要能量0.388 MeV；

(4)^{99}Mo–^{99m}Tc，母体半衰期67 h，子体半衰期6.0 h，子体γ辐射的主要能量0.142 MeV；

(5)^{113}Sn–^{113m}In，母体半衰期115 d，子体半衰期99.8 min，子体γ辐射的主要能量0.393 MeV；

(6)^{132}Te–^{132}I，母体半衰期3.2 d，子体半衰期2.3 h，子体γ辐射的主要能量0.670 MeV；

(7)^{137}Cs–^{137m}Ba，母体半衰期30年，子体半衰期2.6 min，子体γ辐射的主要能量0.662 MeV。

其中以^{99}Mo–^{99m}Tc和^{113}Sn–^{113m}In发生器应用最广。

第四章　放射性同位素的应用

放射性同位素能自发产生对物质具有穿透能力的α射线、β射线、γ射线或中子射线，制备主要方式为核反应堆生产丰中子同位素、带电粒子加速器生产缺中子同位素、从核燃料后处理料液中分离提取裂变同位素。放射性同位素技术已经广泛应用于国民经济的许多领域，在医学、工业、农业、资源环境、考古等多领域的应用已获得了显著的经济效益、社会效益、环境效益，是核能利用的一个重要方面。

第一节　放射性同位素在医学上的应用

一、放射性药物影像诊断

1.γ照相机

γ照相机是核医学科最基本的显像仪器。由直径30~60 cm的γ闪烁探测器、计算机操纵运算台和显示器等部件组成。口服或静脉注射进入脏器的放射性同位素制剂所放出的γ射线由γ闪烁探测器探测后，形成脉冲信号由计算机采集和处理，最后以不同的灰度、颜色和不同方式显示出脏器和病变的影像。

2.单光子发射计算机断层扫描仪(SPECT)

单光子发射计算机断层扫描仪(SPECT)是指放射性药物注入脏器，γ射线由体内向外发射，而XCT是将X射线从体外穿透人体到达接收器，故XCT属穿透型CT(TCT)。

3.正电子发射计算机断层扫描仪(PET)

PET是专门探测体内正电子在发射体湮没辐射时同时产生的方向相反的能量为0.511 MeV的两个γ光子的显像仪器。数十个直至上百个小的γ闪烁探测

器环形排列，在人躯体四周同时进行探测。它的其他部件基本上同SPECT。

PET是目前所有放射性显像技术中分辨率最高的显像装置，特别适用于心脏、脑神经、肿瘤的代谢显像，进行肿瘤的早期诊断。但因设备和正电子发射体价格较贵，所以难以推广应用。

4.骨密度仪

骨密度仪是利用放射性同位素对人体骨骼中的钙、磷含量进行无损检测，可诊断原发性、继发性骨质疏松等，并能做到早期发现。仪器由计算机控制，测量速度快，操作简便。一般使用的放射性核素，活度为3.7 GBq(100 mCi)。

二、放射治疗

1.近距离治疗

近距离治疗分为表浅治疗和腔内治疗。表浅治疗一般利用β放射源，常将^{32}P、^{90}Sr-^{90}Y、^{147}Pm、^{204}Tl、^{153}Sm等密封，制成各种敷贴器，贴在患部，治疗血管瘤、皮炎等皮肤病。其中以^{90}Sr-^{90}Y用得最多，^{90}Sr的活度可达3.7 GBq(100 mCi)。

腔内治疗常用的放射性核素为^{226}Ra、^{198}Au、^{192}Ir、^{125}I、^{60}Co等。源的外形一般制成丝状、针状、哑铃状或颗粒状(中子源)，尺寸很小，外径零点几毫米至2 min或3 min，长几毫米至几十毫米。过去用镭针和钴针放入腔内治疗较多，目前更趋向于以^{125}I作为永久性“种子”植入组织中治疗癌症。每个^{125}I中子源的活度≈3.7×10^{7} Bq。

2.远距离治疗

体外远距离治疗即用强γ或β射线照射肿瘤组织，达到治疗目的。只要按肿瘤部位、大小和深度等计算出并准确地控制肿瘤吸收剂量，就可以杀死癌细胞或抑制癌细胞的增长。此方法一般用于浅表肿瘤的治疗，如乳腺癌、肺癌、食道癌、甲状腺癌等。

三、体外放射免疫分析

在当前医学临床诊断中，将同位素标记技术与抗原、抗体反应的特异性相结合的检测方法称为放射免疫分析技术。将同位素标记的抗原与未标记的相同抗原按比例混合与定量的响应抗体反应，则标记与未标记的抗原相互竞争，与抗体形成免疫复合物。作为标准蛋白或待测样品而引人的未标记抗原竞争性地抑制了标记抗原与抗体结合，未标记抗原的量越大，抑制程度就越大，这

种特异性抑制的数量关系就是放射免疫测定的定量基础。这种分析方法具有精确、灵敏度高、特异性强、检测迅速、应用广泛等特点，一直是临床诊断的一种重要手段。用于测定体内各种微量生物活性物质，如激素、蛋白质、抗原、抗体和维生素等，在很多领域起着重要的作用。

四、癌症治疗

癌症治疗是指用适度剂量的射线对癌细胞进行适当的照射，达到杀死癌细胞的目的。

放射性核素的治疗作用主要是通过放射性核素衰变产生的放射线来实现的。一方面，机体组织的蛋白质、染色体和酶等生物大分子受到电离辐射作用后正常生理功能受破坏，同时可以通过射线作用于机体内的水分子，使其发生电离，产生自由基和过氧化物，间接地导致生物大分子的损害。另一方面，在核酸、染色体及酶的损害基础上，进一步引起广泛的组织细胞生理、生化及形态的改变，从而使细胞产生死亡、凋亡或者失去进一步分化增殖的能力。

影响放射性核素治疗有效的主要因素有：放射性核素本身的物理性质，如射线的类型、能量及半衰期和给药剂量；放射性核素在肿瘤组织中的分布强度，核素在肿瘤组织中越多则产生的效果越强；肿瘤组织对放射越敏感，则治疗效果越好。

第二节　放射性同位素在工业上的应用

一、同位素监控和分析仪表

放射性同位素放出的射线作为一种信息源可取得工业过程中的非电参数和其他信息。根据这一原理制作的各种同位素监控仪表，如核子秤、料位计、测厚仪、密度计、水分计、γ射线探伤机、集装箱检测和离子感烟火灾报警器等可用来监控生产流程，实现无损检测、成分分析以及探知火情等。

1. 核子秤

核子秤是利用γ射线穿透输送机上的物料时一部分被吸收的原理而进行工作的，放射源及γ射线探测器均不接触输送机和物料。核子秤的主要优点有以下几个方面：

(1)不受物料的物理化学性质的影响,不受输送机的振动、厚度、惯性、磨损等因素的影响。动态测量精度高,性能稳定,工作可靠。结构简单、安装维修方便,不影响输送机的正常工作,也不需要对原有输送装置作较大的改动。可在恶劣的环境下工作。适用范围广,除皮带输送机外,还可以用于其他结构的物料输送机。微机的功能强,可显示多种监测参数,进行打印与报警,并可给出多种模拟量或开关量信号供用户使用。

(2)像任何一种计量仪器一样,核子秤也有一定的局限性与适用范围。核子秤是利用物料对γ射线的吸收进行计量的,如果物料厚度、粒变、成分、堆积形状变化过大,对γ射线的吸收就不完全相同,从而可能影响核子秤的精度。但大量的实验表明,如果实物定标时的流量与正常流量相似,那么,即使物料的物理形状有较大的变化,流量在正常流量附近相当宽的范围内变化时,核子秤仍能保证精度。

2. 料位计

料位计是利用γ射线通过介质后被吸收减弱的程度不同,对各种形态物料的位置进行非接触无损检测式的核仪表。它具有安装简单、指示可靠、仪器本身坚固耐用并易实现生产过程自动控制。特别适用于高温、高压、密闭容器、强腐蚀等条件下物料位置的测定及远距离自动测量和控制。

3. 测厚仪

测厚仪用于测定纸张、胶片、塑料、金属薄膜等的厚度。将测厚仪安装在生产线上,对产品的厚度进行定量自动控制,使产品厚薄均匀,提高了产品的质量。

测厚仪使用的放射源常用为β射线源和γ射线源,一般测量纸张厚度使用β粒子能量较低的^{147}Pm,测量塑料薄膜用^{204}Tl或^{85}Kr源,而测量金属薄膜选用β粒子能量较高的源。其活度在0.37 GBq(10 mCi)~18.5 GBq(500 mCi)。测量木材、钢板则常用^{241}Am、^{137}Cs源,活度为0.37 GBq(10 mCi)。

4. 核子湿度密度仪

核子湿度密度仪用于快速、准确地测量各种土、沥青混凝土等建筑材料的密度和含水量,还可测量铁路和公路路基的湿密度。

核子湿度密度仪经常用于沥青路面测量,以确定混合料的压实率。一般是在铺路面时,跟在铺路车后面进行测量。压路机每走一次,就在路面进行一次

测量，直到把沥青材料压实到设计要求的程度。

5. 放射性测井

放射性测井是利用γ射线和中子与钻井周围岩石和井内介质发生作用，研究钻井剖面的特性，寻找有用矿藏及研究油井工程质量的一种矿场地球物理方法。在地质勘探中，特别在石油的地质勘探中得到了广泛的应用。

放射性测井法中目前常用的γ放射源为^{137}Cs，活度一般为7.4~74 GBq(0.2~2 Ci)；常用的中子源为^{241}Am–Be中子源，活度为185~740 GBq(5~20 Ci)。

6. γ射线照相(探伤)机

γ射线照相(探伤)机也是利用放射性同位素发出的射线具有穿透性这一特性，来检验大型铸件或管道焊接的质量。因为不需要电源、搬运方便，所以特别适合在野外和施工现场使用。

7. 其他应用

通过辐射接枝交联技术进行改性，得到新的高分子化合物；利用放射性同位素^{210}Po、^{238}Pu等制作的放射性静电消除器，具有结构简单、安装容易、使用方便和不用电等优点。

利用放射性同位素发出的α射线使空气电离，中和静电而达到消除静电的目的，可清除唱片、幻灯片、照相底片、摄影镜头等上的灰尘。

二、工业同位素示踪

放射性同位素的探测灵敏度极高，这是常规的化学分析无法比拟的。利用微量同位素动态追踪物质的运动规律是放射性示踪不可替代的优势。目前，这一技术已广泛用于石油、化工、冶金、水利水文等部门，并取得了显著的经济效益。

三、同位素电池

放射性同位素在进行核衰变时释放的能量可以用于制造特种电源——同位素电池。这种电池是目前人类进行深空探索唯一可用的能源，其特点是不需外界能源，小巧紧凑，使用寿命长。

四、辐射加工

辐射加工是利用射线电离辐射作为一种先进的手段对物质和材料进行加工处理的一门技术。这种加工方式目前已在交联线缆、热缩材料、表面固化、医

疗用品消毒以及食品辐照保藏等领域取得了显著成效，形成了产业规模。

第三节　放射性同位素在农业上的应用

一、辐射育种

应用反应堆产生的热中子、加速器产生的快中子以及放射性同位素放出的射线都可以使生物细胞内遗传物质的结构发生改变，引起生物形形色色的性状突变，获得有价值的新突变体，从而育成优良品种。我国辐射突变育种的新品种占世界总数的1/4，特别是粮、棉、油等作物的推广取得了显著的增产效果。

进行辐射育种的辐射可以是X射线、γ射线和中子，用得最多的是^{60}Co γ源。X射线和γ射线辐照时，一般使用的剂量范围为$1.3\times10^2 \sim 3.5\times10^2$ Gy；对于中子辐照，一般使用的剂量范围为 $1\times10^{10} \sim 1\times10^{13}$ n/cm^2。

二、农业示踪技术

示踪方法是引入少量放射性同位素，并随时观察其行踪的方法。同位素示踪在农业中的应用主要是从事肥料与农药的效用和机理、有害物质的分解与残留探测、畜牧兽医研究以及农田水利方面检查测定堤坝、水库的泄漏等。方法是把放射源同位素标记在农药或化肥上，施在土壤中，可测定作物在吸收过程中的标记物分布情况，了解其在植物体内的吸收途径、作用部位和机制等，以便选择最佳的农药和化肥。另外，还可以用于生物固氮、家畜疾病诊断及其妊娠预测等方面的研究。

常用的放射性核素为^{14}C、^{32}P、^{35}S、^{65}Zn、^{125}I等。

三、农副产品的辐照保鲜

辐照保鲜是利用放射性同位素或低能加速器放出的射线对食品进行辐射处理，达到长期保藏食品的目的。辐照灭菌是利用放射性同位素发出的射线彻底灭菌，是射线杀伤力的一种最直接的利用。

辐照保鲜用源主要为^{60}Co，活度3.7×10^{14} Bq(1万Ci)以上。

四、昆虫辐射不育

电离辐射可使昆虫丧失生殖能力，从而降低害虫的数量，进一步达到防治

甚至根除害虫的目的。昆虫辐射不育是一种先进的生物防治方法,不存在农药的环境污染问题。国外使用该技术在大面积根除地中海果蝇以及抑制非洲彩蝇方面取得了重大成果。而我国用此法对玉米螟、小菜蛾、柑橘大实蝇等害虫的辐射不育研究,也取得了较好的防治效果。

在食品加工方面主要用于:

(1)放射性同位素在食品加工中主要用于灭菌保鲜。

(2)辐照过的酒可提高醇香度,相当于放置几年或几十年。

(3)用放射性同位素辐照过的猪肉,保鲜期延长而味道不变。

在考古学方面可根据放射性同位素的半衰期推算地质年代。放射性同位素 ^{14}C 被考古学家称为"碳钟",它可以用来断定古生物体死亡至今的年代。

第五章　辐射事故

第一节　放射源的分类原则

参照国际原子能机构的有关规定，按照放射源对人体健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类，V类源的下限活度值为该种核素的豁免活度。

(1) Ⅰ类放射源为极高危险源。在没有防护的情况下，接触这类源几分钟到1 h就可致人死亡。

(2) Ⅱ类放射源为高危险源。在没有防护的情况下，接触这类源几小时至几天可致人死亡。

(3) Ⅲ类放射源为危险源。在没有防护的情况下，接触这类源几小时就可对人造成永久性损伤，接触几天至几周也可致人死亡。

(4) Ⅳ类放射源为低危险源。基本不会对人造成永久性损伤，但对长时间、近距离接触这些放射源的人可能造成可恢复的临时性损伤。

(5) Ⅴ类放射源为极低危险源。不会对人造成永久性损伤。

非密封源工作场所应按表5–1将非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。

表5–1　非密封源工作场所的分级

级　　别	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4\times10^9$
乙	2×10^7~4×10^9
丙	豁免活度值以上~2×10^7

相关放射源具体分类详见附录A。

第二节 辐射事故与事故应急响应

辐射事故是指放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致人员受到意外的异常照射。

根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故4个等级。

(1)特别重大辐射事故，是指Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致3人以上(含3人)急性死亡。

(2)重大辐射事故，是指Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致2人以下(含2人)急性死亡或者10人以上(含10人)急性重度放射病、局部器官残疾。

(3)较大辐射事故，是指Ⅲ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致9人以下(含9人)急性重度放射病、局部器官残疾。

(4)一般辐射事故，是指Ⅳ类、Ⅴ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

应急响应是出现紧急情况时的行动，是应急方案准备的一种，即编制应急方案，对出现紧急情况时的人员行动作出规定，有秩序地进行救援，以减少损失。

应急原则：以人为本，预防为主；统一领导，分类管理；属地为主，分级响应；专兼结合，充分利用现有资源。

第六章　常用放射性同位素

第一节　钴-60

一、记法

钴-60符号为$^{60}_{27}Co$，简写为^{60}Co。

二、核素类型

钴-60是一种人工放射性同位素，质量数为60。它是由普通的金属钴-59在原子反应堆中经过热中子照射轰击而生成的不稳定的放射性同位素。

三、衰变方式

钴-60是β^-衰变核素，发射β^-和γ射线。

钴-60衰变纲图如图6-1所示。

四、[illegible]

透过β^-衰变时放出能量高达315 keV的高速电子成为镍-60，同时会放出两束γ射线，其能量分别为1.17 MeV及1.33 MeV。

五、半衰期

钴-60的半衰期为5.27 年。

六、生产方式

产生钴-60的核反应有以下各种：^{59}Co (n,γ)^{60}Co、^{59}Co (d,p)^{60}Co、^{62}Ni(d,α)^{60}Co、^{63}Cu(n,α) ^{60}Co和铋的散裂裂变反应等。只有第一种核反应具有工业生产意义。实际生产中，用天然金属钴(^{59}Co的丰度为100%)或含钴的其他合适材料

制成靶子,在高中子注量率反应堆中辐照适当时间,即可获得比活度高的钴-60,高的已达(2.59~2.96)×10^{16} Bq/kg,如加以放射化学分离,还可达到3.33×10^{13} Bq/kg或更高。

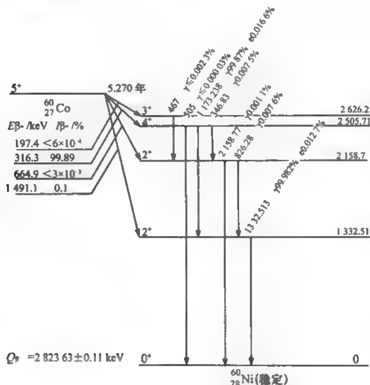


图6-1 钴-60衰变纲图

七、钴-60放射源的制备工艺过程

(1) 将金属钴加工成棒、丝、粒或团片,再镀镍保护;

(2) 进行制靶前预处理,装入靶筒密封;

(3) 反应堆辐照;

(4) 出堆后送热室中切开靶筒,取出照好的钴-60,测量活度;

(5) 定量装人源包壳;

(6) 焊封;

(7) 强放射源则再加第二层包装,焊封;

(8) 进行质量检验,不漏气,表面放射性污染应<1.85×10^{3} Bq。

八、应用领域

钴-60放射源的应用非常广泛，几乎遍及各行各业。

(1)工业方面：常用于无损探伤、辐射消毒、辐射加工、辐射处理废物，以及用于厚度、密度、物位的测定和在线自动控制等。

(2)农业方面：常用于辐射育种、刺激增产、辐射防治虫害。

(3)医学方面：常用于癌和肿瘤的放射治疗。

(4)食品加工方面：应用钴-60 γ射线或β射线在不需要拆箱、拆封的状况下穿透食品，杀死食品中寄生的昆虫和细菌、霉菌、大肠菌群及致病菌的原理，提高食品的卫生质量和延长食品的保藏期，如图 6-2所示为辐照装置，正在进行蔬菜的辐照保鲜试验。

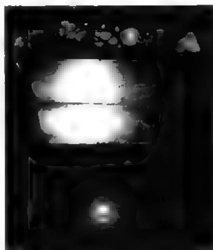


图 6-2　钴-60辐照装置

九、事故应急

1. 危害

(1)钴-60属高毒性核素，对全身有影响，对人体的有效半衰减期为9.5 d，具有极强的辐射性，能导致脱发，会严重损害人体血液内的细胞组织，造成白血球减少，引起血液系统疾病，如再生性障碍贫血症，严重的会使人患上白血病(血癌)，甚至死亡。

(2)钴-60在人体中的最大容许积存量为3.7×10^5 Bq。钴-60在放射性工作场所空气中和露天水源中的最大容许浓度分别为0.33 Bq/L和370 Bq/L，其化学性质与元素钴相同。

(3)危害面积较大，二十多公里，可以形成放射性沾染，形成更远的传播。

(4)通过其本身的放射性传给人，且被沾染的人也具有放射性。在空气中可以传播，只有用厚厚的铅才能阻挡。

(5)没有其他辅助时不会爆炸。

2. 预防

(1)钴-60要用铅容器密闭保存，工作环境中有钴-60放射性元素时，一定要穿专用防护服，平时多喝绿茶。因为饮茶能有效地阻止放射性物质侵入骨髓，并可使钴-60迅速排出体外，茶叶中的儿茶素类物质和脂多糖物质可减轻辐射对人体的危害，对造血功能有显著的保护作用。用茶叶片剂治疗由于放射引起的轻度辐射病的临床试验表明，其总有效率可达90%。

(2)对于溶入钴的液体要特别小心，尽量不要用皮肤接触，因为钴的渗透性很强，很容易进入皮肤内层。

第二节　铯-137

一、记法

铯-137符号为$^{137}_{55}Cs$，简写为^{137}Cs。

二、核素类型

铯-137是一种人工放射性同位素，质量数为137。铯-137是核弹、核武器试验和核反应堆内核裂变的副产品之一。

三、衰变方式

铯-137是β^-衰变核素，发射β^-和γ射线。

铯-137衰变纲图如图6-3所示。

四、能量

铯-137是β^-衰变核素，发射两种β^-粒子，最大能量分别为0.514 MeV (94.0%)和1.176 MeV (6.0%)，铯-137发射0.514 MeV的β^-射线后，转变为^{137m}Ba (或写作钡-137m)。^{137m}Ba作同质异能跃迁衰变，其γ能量为0.662 MeV，半衰期为2.55 min。铯-137—钡-137 m能迅速达到放射性平衡，所以铯-137既可作β^-放射源又可作γ放射源。

五、半衰期

铯-137的半衰期为30.17 年。

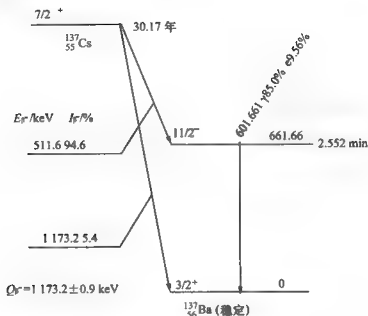


图6-3 铯-137衰变纲图

六、制备工艺

工业上一般使用分离法，即从核燃料后处理的高放射性废液中分离铯-137。20世纪50年代曾用沉淀分离法，如硫酸铝、磷钨酸盐、亚铁氰化镍等方法。20世纪60年代曾用溶剂萃取和离子交换法(磷酸锆、磷钼酸铵和沸石)。20世纪70年代以来，人工合成各种新的无机交换剂，如硅铝酸盐和磷酸钛，以及各种复合无机交换剂，它们对铯-137都有较大的交换容量和良好的选择性；由于无机离子交换剂具有耐辐照和热稳定性好等优点，世界各国都采用或准备采用它来分离铯-137。从核燃料后处理过程中产生的大量低放射性废液中，去除铯-137可用的天然无机交换剂有蒙脱石、蛭石、斜长沸石等，其中以斜长沸石性能最佳。

七、应用领域

从裂变产物中分离出的铯-137可制作辐射源，铯-137源与钴-60源比较，有半衰期长、价格便宜、防护要求低等优点。

(1)工业方面：可用作厚度计、密度计、流量计和液位计的辐射源，也可用作自屏蔽辐照装置。用于监测工业产品的重量、厚度和密度，以及探测焊接点和金属管道的裂缝，也用于校对用来监测放射治疗人员及病人所接受的辐射水平的辐射监测仪器、测井勘探煤田等。

(2)农业方面：用于辐射育种，还可用于食品辐照保藏。

(3)医学方面：可用于心肌扫描，医疗器械的杀菌，癌症的治疗和辐射加工；还可用来诊断甲状腺肿瘤，校对医治癌症的放射治疗设备等。

八、危害与防护

主要危害是引起细胞的基因异变，一般仪器用的“杀伤”距离在1 m左右，人只要穿上铅背心就可以达到防护的目的。剂量较大时，需要进行隔离操作。仪器操作人员和放射性检测工作人员做好防护工作，所受照射年累积剂量控制在规定的范围以内。

第三节　镅-241

一、记法

镅-241符号为$^{241}_{95}Am$，简写为^{241}Am。

二、核素类型

镅-241是一种人工合成的放射性化学元素，它的化学符号是^{241}Am，它的原子序数是95，属于锕系元素之一。

三、衰变方式

镅-241原子能自发地辐射出α粒子，经α衰变生成^{237}Np。

四、[illegible]

在释放α粒子的过程中，镅-241原子转变为镎-237原子。α粒子以很高的速度——或许达到了$1.6×10^4$ km/s离开衰变现场。

五、半衰期

镅-241的半衰期为433 年。

六、生产方式

^{241}Am是^{241}Pu的衰变子核，^{241}Pu、^{238}U多次中子俘获也可得到^{241}Am。经长期放置的含有^{241}Pu的钚钚是提取^{241}Am的重要原料，从动力堆后处理高放废液只能提取^{241}Am和^{243}Am的混合物。

镅-241放射源生产：将装有AmO_2粉末的铅屏蔽容器送入称量小室，在称量小室内完成接收、称量工作后通过共用通道进入混料小室；在混料小室内完成混料工作后进入压制小室；在压制小室内完成源芯制作工作后进入装配小室；在装配小室内将压制好的源芯装入源壳形成源体，再焊封源体；此前工作均在带屏蔽手套箱内进行。上述工作完成后，将源体装人铅容器进行源体检漏，若检测不合格返回重新装配，合格的源体进行表面去污后送往活度检测小室进行活度检测、表面处理、产品标志，生产的镅-241低能放射源放入成品库存放。

七、应用领域

(1)工业方面：^{241}Am的软γ射线适合于低密度材料的γ探伤，还可用于火灾报警器，其基本原理是α射线同烟雾粒子作用可以造成空气电离的改变。^{241}Am用于制造镅—铍中子源。^{241}Am是辐照生产^{242}Cm的靶料。另外，还用于刻度源、研究堆启动源、测井源、测厚仪、料位计、湿度仪、静电消除器、避雷器等。

(2)医学方面：骨密度仪。

八、危害

镅-241放射源，表面剂量较低，在正常使用情况下不会对人造成危害，但镅-241属极毒类放射性物质，其半衰期为433 年，这种放射性物质一旦进入人体便会积聚于人体骨骼中形成内照射，并且很难从人体中排出。在体内，镅-241放出的高能α粒子具有极强的电离性，会造成人体组织水分的电离和激发，导致机体损伤。

第四节　碘-131

一、记法

碘-131符号为$^{131}_{53}I$，简写为^{131}I。

二、核素类型

碘-131是一种人工放射性同位素，质量数为131，是碘的放射性同位素中的一种。

三、碘-131同位素

碘的稳定性核素只有^{127}I，其他同位素都为放射性，常用^{123}I、^{124}I、^{125}I和^{131}I，化学形式为NaI。

^{123}I和^{124}I均由加速器生产，前者半衰期13.2 h，发射159 keV的γ射线；后者半衰期4.2 d，湮没辐射后发射511 keV的γ射线。

^{125}I和^{131}I均由反应堆生产，前者半衰期60 d，发射27~35 keV的γ射线；后者半衰期8 d，发射334 keV和606 keV的$β^-$、364 keV和637 keV的γ射线。

^{123}I和^{131}I可供直接口服，用于甲状腺功能测定和甲状腺及其肿瘤SPECT显像，其中^{123}I特别适用于儿童和孕妇，^{131}I则还可用于治疗甲状腺功能亢进和甲状腺分化型癌。^{124}I、^{123}I和^{131}I可供制备各种含碘的放射性药物，分别用于PET和SPECT显像、诊断和治疗。^{125}I标记免疫活性物质后用于体外微量分析，直接罐装在粒子中用于肿瘤近距离内放疗。碘标记放射性药物有：$Na^{131}I$（碘化钠）、^{131}I-MIBG（间位碘苄胍）、^{131}I-抗体等。

四、衰变方式

碘-131是$β^-$衰变核素，发射$β^-$和γ射线。

碘-131衰变纲图如图6-4所示。

五、能量

碘-131发射0.334 MeV和0.606 MeV的$β^-$、0.364 MeV和0.637 MeV的γ射线，主要γ射线能量为0.364 MeV。$3.7×10^7$ Bq的碘-131重$8.05×10^{-6}$ g。$3.7×10^7$ Bq的

碘-131点源在1 cm远处的照射量率是1.65×10^{-7} c/(kg·s)，采用 5 cm厚的铅屏蔽就可以安全操作3.7×10^{10} Bq的碘-131。

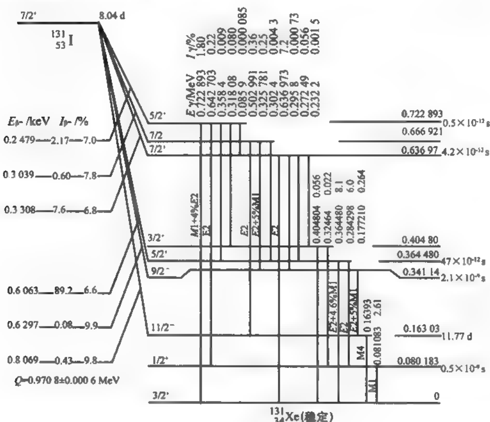


图 6-4 碘-131衰变纲图

六、半衰期

碘-131的半衰期为8.04 d。

七、生产方式

产生碘-131的核反应主要方法有:①用碲金属或其化合物(如二氧化碲)做靶材料，在反应堆中照射，通过(n,γ)反应生成碲-131，碲-131再经过β^-衰变而获得碘-131，即$^{130}Te(n,\beta)^{131}I$；②用富集的铀-235做靶材料，通过核的裂变$^{235}U(n,f)^{131}I$或$^{235}U(n,f)^{131}I$而得到碘-131，碘-131的总裂变产额约2.82%。

方法①可以获得较纯的产品，没有α杂质和其他裂变产物的污染，世界上许多国家都采用这个方法；用方法②制备碘-131时，除可能有其他放射性碘同

位素的污染外，还有α杂质和β杂质，必须进行有效的纯化，只有少数国家使用。

从靶材料二氧化碲中将碘-131提取出来的方法有干馏法、色谱法、萃取法和蒸馏法等，应用较多的是干馏法和蒸馏法。蒸馏法是将辐照过的二氧化碲溶解于氢氧化钠溶液，加入过氧化氢、钼盐等，然后在硫酸介质中进行蒸馏。含有碘-131的馏分用加有还原剂的氢氧化钠吸收，碘-131便以$Na^{131}I$溶液的形式得到。$Na^{131}I$溶液是碘-131的初级产品。

大量生产碘-131时，要注意避免碘-131挥发，以免给环境带来严重污染。操作应在设有负压和带有除碘装置的屏蔽箱室里进行。活性炭、涂银活性炭、银铜合金网、银网和碱性溶液等都是碘-131的良好吸附剂。

八、应用领域

(1)工业方面：碘-131可用来寻找地下水和测定地下水的流速、流向，查找地下管道泄漏；可用来测定油田注水井各油层吸水能力及其变化，以便及时有效地采取措施，调节水流的分配，保持油井的高产、稳产等。

(2)医学方面：在核医学中，碘-131除了以$Na^{131}I$溶液的形式直接用于甲状腺功能检查和甲状腺疾病治疗外，还可用来标记许多化合物，供体内或体外诊断疾病用。如碘-131标记的玫瑰红钠盐和马尿酸钠就是常用的肝、胆和肾等的扫描显像剂。

第五节　锎-252

一、记法

锎-252符号为$^{252}_{98}Cf$，简写为^{252}Cf。

二、核素类型

锎-252是一种人工放射性同位素，质量数为252。这种同位素首次发现于氢弹爆炸后的尘埃，是能够产生丰富中子的唯一核素。

三、衰变方式

锎-252核素自发裂变放出大量中子，同时伴随放出α粒子和γ射线。

四、能量

锎-252中子平均能量为2.348 MeV，其α能量大约为6 MeV。因此，用锎-252可以制成片状裂片α裸源和高活度的密封中子源。

五、半衰期

锎-252的半衰期为2.638 年。

六、生产方式

最早得到锎-252是用高能量α粒子轰击锔-242获得的。另外将^{242}Pu，^{243}Am或^{244}Cm以氧化物形式与铝制成金属陶瓷体靶棒，在高通量反应堆中照射，18个月后从10g^{242}Pu靶棒可得到1.7 g锔，0.46 mg锫和5.2 mg锎。

目前全世界^{252}Cf的年产量约为克级。^{252}Cf可有^{239}Pu在反应堆中长期辐照，通过13次连续的中子俘获反应和4次$β^-$衰变生产。制备^{252}Cf的最佳途径是先在反应堆中长期照射^{239}Pu以积累^{242}Pu，然后将^{242}Pu分离出来制成^{242}Pu靶，再在高通量堆中照射，最终分离出^{252}Cf。

七、应用领域

(1)工业方面：可用于中子活化分析，该分析方法灵敏度高，能精确测定物质成分、杂质含量。可用于海关监测毒品和可爆炸物质，锎-252现在大部分都是用来检测飞机行李内是否有爆裂物存在。锎-252中子源用于新建反应堆的点火启动，还可以用于核子秤。

(2)医学方面：在核医学领域可用来治疗恶性肿瘤。由于锎-252中子源可以做得很小很细，这是其他中子源所做不到的，所以，把中子源经过软管送到人体腔内器官肿瘤部位，或者植入到人体的肿瘤组织内进行治疗。特别是对子宫癌、口腔癌、直肠癌、食道癌、胃癌、鼻腔癌等，锎-252中子治疗都有相当好的疗效。

第六节　锶-89

一、记法

锶-89符号为$^{89}_{38}$Sr，简写为^{89}Sr。

二、核素类型

锶-89是一种人工放射性同位素，质量数为89。锶-89是钙族元素，为一种亲骨性放射性核素。

三、衰变方式

锶-89为纯β^-发射体。

锶-89衰变纲图如图6-5所示。

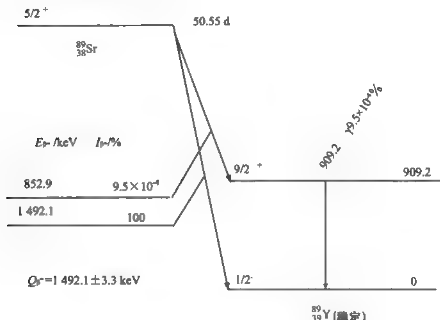


图 6-5 锶-89衰变纲图

四、能量

锶-89是一个发射纯β^-射线的最大能量为1.463 MeV，平均能量为0.58 MeV，对软组织的平均射程为2.4 mm。

五、半衰期

锶-89的半衰期为50.55 d。

六、生产方式

锶-89通常利用热中子通过^{88}Sr (n,γ)^{89}Sr反应或利用快中子通过^{89}Y(n,p)^{89}Sr

反应生产。

七、应用领域

锶-89主要应用在医学领域，$^{89}SrCl2$是用于减轻恶性肿瘤骨转移骨痛的亲骨性放射性药物，111~148 MBq的^{89}Sr可使恶性肿瘤骨转移引起的骨痛明显缓解3~6个月，有效率可达60%~84%，具有很大的临床应用价值。^{89}Sr是以$^{89}SrCl_2$的形式静脉注射至体内，使用剂量为1.48~2.22 MBq/kg。因为锶-89是纯β^-核素，所以对周围环境以及家人的辐射危害极小，而且对患者骨髓造血功能无明显影响，极少数患者可能出现一过性白细胞或血小板减少，对人体无明显毒副作用。

第七节　锶-90

一、记法

锶-90符号为$^{90}_{38}Sr$，简写为^{90}Sr。

二、核素类型

锶-90是一种人工放射性同位素，质量数为90。锶-90是钙族元素，为一种亲骨性放射性核素，属高毒性核素。

三、衰变方式

锶-90为纯β^-发射体。

锶-90衰变纲图如图6-6所示。

四、能量

β^-射线的最大能量为0.546 MeV。

五、半衰期

锶-90的半衰期为28.6 年。

六、生产方式

锶-90是铀-235的裂变产物之一，产额为5.90%。大量的锶-90是作为核燃料后处理工厂的副产品从回收铀和钚的高放射性废液中分离得到的。

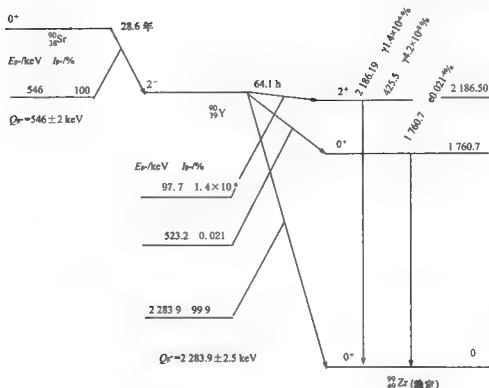


图 6-6 锶-90衰变纲图

七、应用领域

(1)工业方面：锶-90的高能量β^-辐射撞击到高原子序数的物质上会产生X射线，根据这一特性，锶-90被制成测厚仪、料位计等的配套辐射源，用于工业生产过程中有关参数的测定和自动控制。锶-90的高能量β^-辐射作用于半导体材料(如锗、硅等)的p-n结，可以通过收集电荷的办法实现辐射能—电能的转换。锶-90可以作为刻度源。

(2)医学方面：利用锶-90—钇-90制成的敷贴器可以治疗皮肤癌及其他皮肤病。在物理化学、生物学中，用锶-90作指示剂，可以研究某些毛细管的渗透性和新陈代谢过程的机理等。

八、危害

(1)锶-90是铀的裂变产物之一。主要来自核爆炸产物，一些微小的放射性

灰尘能悬浮在大气中很多年。

(2)放射性矿物的开采和加工、放射性物质的生产和应用,也能造成对空气的污染。

(3)放射性元素在体外,对机体有外照射作用;通过呼吸道进入机体,则有内照射作用。

放射性物质在肺中的浓度,通常比在其他器官中大,因而肺组织一般受到较强的照射。肺部的巨噬细胞在吞噬了放射性微粒后,可形成电离密度相当高的放射源,进入肺中的放射性物质能十分迅速地散布到全身。

(4)除核爆炸地区外,大气中的放射性物质,一般不会造成急性放射病,但长时间超过允许范围的小剂量外照射或内照射,也能引起慢性放射病或皮肤慢性损伤。

(5)大气中放射性物质对人体更重要的影响是远期效应,包括引起癌变、不育和遗传的变化或早死等。

第八节 锝-99m

一、记法

锝-99m符号为$^{99m}_{43}Tc$,简写为^{99m}Tc。

二、核素类型

锝-99m是一种人工放射性同位素,质量数为99。43号元素锝的21种同位素之一,是^{99}Tc的激发态同质异能核素,它在元素周期表上居于第Ⅶ副族,化学性质与锰相似,有些地方也与第Ⅶ主族卤族元素相似。

三、衰变方式

锝-99m为γ发射体。

锝-99m衰变纲图如图6-7所示。

四、能量

锝-99m发射单纯低能γ射线,能量为140 keV,然后转变成锝-99。

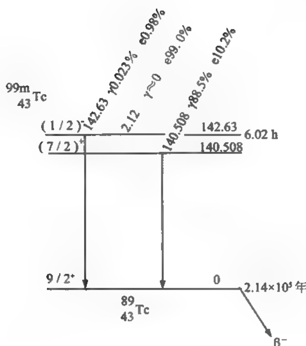


图 6-7 锝-99m衰变纲图

五、半衰期

锝-99m半衰期为6.02 h。

六、生产方式

锝-99m可从商品化的钼-99—锝-99m发生器获得。

^{99}Mo-^{99m}Tc发生器(简称^{99m}Tc发生器)是当今核医学中最广泛使用的放射性核素发生器。^{99m}Tc药物约占体内放射性药物用量总量的80%。

^{99m}Tc的半衰期为6.02 h,γ能量为140 keV,非常适合于单光子计算机断层显像(SPECT),而且对人体的辐射剂量比较小,核性质比较理想。^{99m}Tc具有多种化学价态,可以标记各种配体药物,用于脑、心脏、骨、甲状腺、肿瘤、肺、肝、胆、肾、淋巴等几乎所有脏器和组织疾病的诊断。以^{99m}Tc药物为代表的临床核医学已发展成为灵敏度高、无创伤性的重要检测手段。功能性检查是核医学的突出优点,例如^{99m}Tc-MIBI对冠心病的检查灵敏度高于90%,特异性高达85%,准确性接近90%,特别是对心肌存活性的检查远优于其他方法,^{99m}Tc-MDP对恶性骨

转移癌的检查灵敏度达90%，与X射线诊断相比，可提早3~6个月发现病灶；^{99m}Tc-ECD对短暂性脑缺血的诊断阳性率远高于XCT和NMR法。

^{99}Mo-^{99m}Tc发生器于20世纪50年代研制成功。40多年来，它已发展成为最富有生命力的一种放射性核素发生器。

^{99m}Tc发生器的母体核素^{99}Mo可以利用反应堆热中子辐照光谱纯的天然钼^{98}Mo(n,γ)^{99}Mo或者铀裂变^{235}U(n,f)^{99}Mo方法来生产。^{98}Mo的热中子活化截面(0.13 b)比较小，用(n,γ)反应生产的^{99}Mo的比活度只能达到3.7×10^{10}~3.7×10^{11} Bq/g。中子辐照天然钼(^{98}Mo丰度为23.78%)生产^{99}Mo的缺点是比活度低。裂变法生产^{99}Mo虽然可以生产出放射性纯度高，比活度超过3.7×10^{14} Bq/g的优质医用^{99}Mo。目前世界上大多数国家均采用裂变法生产^{99}Mo来制备^{99m}Tc发生器。

从母体核素^{99}Mo中分离子体核素^{99m}Tc的方法有色谱法、升华法和溶剂萃取法，相应的发生器称之为色谱型发生器、升华发生器和溶剂萃取发生器。经过多年的研究与发展，色谱型^{99m}Tc发生器成为当今性能最优越、使用最广泛的一种类型。

七、应用领域

^{99m}Tc密闭性好，容易达到无菌、无热源的要求，因而非常适用于临床应用。

(1)锝-99m有多种价态，可以制成各种药物，选择性地分布在人体的许多脏器中。

(2)锝-99m在洗脱液中以高锝酸钠(Na^{99m}TcO$_4$)的形式存在。

(3)锝的还原态性质不稳定，在一定pH条件下可以和许多含氧、氮、硫等的有机或无机化合物作用，形成络合物。

这些锝标记络合物无论在体内或体外均比较稳定且无毒性。因此，用锝-99m可制备成多种放射性药物，用于脑、心脏、肝、肾、骨骼、甲状腺等脏器显像。

如今用锝-99m标记的放射性药物达百余种，且多可制成药盒供应，标记简单，使用方便，临床上应用广泛，几乎占全部临床所用放射性核素的80%以上，故有“万能核素”之称。正由于锝-99m的半衰期短和放射低能γ射线，故当使用量较大(7.4×10^{8}~1.11×10^{9} Bq)时，病人所受的辐射剂量仍较小。例如，即便用3.7×10^{7} Bq锝-99m进行甲状腺显像，甲状腺所受的辐射剂量为3.4 mGy，只相当于1.85×10^{6} Bq碘-131甲状腺显像时的辐射剂量(1.05 Gy)的3/1 000。

第九节 氧-15

一、记法

氧-15符号为$^{15}_{8}O$,简写为^{15}O。

二、核素类型

氧-15是加速器生产的短半衰期缺中子放射性核素。

三、衰变方式

氧-15是β^+衰变核素,发射β^+射线。

四、能量

β^+射线其能量为1.7283 MeV,理论比活度可达3.4×10^{18} Bq/mmol。

五、半衰期

氧-15的半衰期为122 s。

六、生产方式

可从回旋加速器中以氘核轰击^{14}N而制得。

七、应用领域

医学领域:$O^{15}O$(表示一个氧-16原子被一个氧-15原子替换)用于脑、肺的PET显像;$CO^{15}O$、$H_2{}^{15}O$等用于血流动力学测定测量心脏的分流和局部肺血流量,即用于脑、心肌和肺显像及功能研究。作为重要医用同位素,用作示踪剂及研究氧在人体内的代谢转换。

第十节 碳-11

一、记法

碳-11符号为$^{11}_{6}C$,简写为^{11}C。

二、核素类型

碳-11是碳的同位素之一，原子核包含了6个质子和5个中子，是碳的短寿命放射性同位素中寿命最长的。

三、衰变方式

碳-11是β^+衰变核素，发射β^+射线。

四、能量

碳-11发射β^+射线的能量为0.96 MeV。

五、半衰期

碳-11的半衰期为20.39 min。

六、生产方式

利用核反应$^{11}B(p, n)^{11}C$、$^{10}B(p, \gamma)^{11}C$、$^{10}B(d, n)^{11}C$、$^{14}N(p, \alpha)^{11}C$可以得到碳-11。

七、应用领域

医学领域：^{11}C-AC PET显像因其能反映心肌的氧耗量，最早用于心脏疾病的诊断、预后评估和疗效观察，后来^{11}C-AC PET显像开始应用于肿瘤研究，并显示了良好的应用前景，目前研究范围涉及前列腺癌、肝癌、肾癌、肺癌、淋巴瘤、鼻咽癌、口咽部肿瘤、胰腺癌、甲状腺癌、卵巢癌、脑胶质瘤和脑膜瘤等，研究内容主要包括各种不同肿瘤对^{11}C-AC的摄取情况、与^{18}FDG PET显像的关系以及肿瘤与炎性病变的鉴别诊断等方面外，^{11}C-AC PET显像在正常人体分布、最佳显像时间、人体各脏器吸收剂量等方面也有所研究。

^{11}C-AC PET显像虽然受半衰期短、只适用于有加速器的单位，只能显示恶性程度相对较低、以有氧代谢提供主要能量的肿瘤细胞，对于某些恶性程度高的病灶常有假阴性结果的发生等因素的限制，但是其在前列腺癌、肝细胞肝癌、肾癌、脑膜瘤等方面的诊断作用还是受到越来越多的重视，特别是其与^{18}FDG PET显像配伍使用后，可以弥补^{18}FDG显像在某些肿瘤的假阴性结果。

第十一节 氮-13

一、记法

氮-13符号为$^{13}_{7}N$,简写为^{13}N。

二、核素类型

氮-13是氮的同位素之一,原子核包含7个质子和6个中子,是一个超级不稳定的放射性同位素。

三、衰变方式

氮-13是β^+衰变核素,发射β^+射线。

四、能量

β^+射线的能量为1.199 MeV。

五、半衰期

氮-13半衰期为9.961 min。

六、生产方式

用质子(氢原子核)轰炸氧-16的原子核得到氮-13。通过核反应$^{10}B(\alpha,n)^{13}N$、$^{12}C(d,n)^{13}N$、$^{12}C(p,n)^{13}N$、$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$可以得到氮-13。

一个质量数为12的碳核(我们把它用C-12来表示)与一个氢核相碰撞,由于隧道效应,氢核可以克服碳核的电场排斥力而与碳核发生聚变,新产生的核是由13个重粒子组成。由于有带正电荷的质子进入,使得原来碳核的电荷数增加,即原子序数变大。新生成的核是质量数为13的一种氮元素的核,它是放射性核,经过一定时间它可以放出两个轻粒子,即一个正电子和一个中微子。氮核衰变成了质量数为13的碳核,它的标记为C-13。现在这个核的电荷数仍就和开始时的碳核的电荷数相同,只不过质量数变大了,它是开始时的碳核的一种同位素。如果有一个其他的质子和这个碳的同位素相碰,就会再次产生氮。它的质量数为14,标记为N-14。如果新的氮核又和一个质子相碰撞,就会反应变成氧-15,即质量数为15的氧核。这种氧核同样是放射性核,它会放出一个正电

子和一个中微子，并衰变成质量数为15的氮核，即氮-15。在这个过程开始的时候只有一个质子数为12的碳核，而现在变成了一个质量数为15的氮核。由此可以看出，由于氢核不断地积聚，使原子变得越来越重。假如这时又有一个质子和这个氮核相碰撞，氮核会放出两个质子和两个中子，并变成一个原始的碳核碳-12，而放出的质子和中子又合并形成一个氦核。这样结束了整个循环。另外，可以从回旋加速器中以氦核轰击^{10}B而制得。

七、应用领域

由于氮-13衰变过程会产生正电子，因此可用于正电子发射电脑断层扫描，通常是把氮-13做成有放射性的氨，然后把它注入人体内，当氮-13衰变并且释放正电子，而正电子会和负电子湮灭产生穿透力极强的γ射线，仪器利用这些射线就可以知道身体里的情况。但氮-13的半衰期只有10 min，因此在医院里必须要有回旋加速器才行。

$^{13}NH_3$用于心肌、脑血流显像，$^{13}NO_2$用于肺功能诊断，用酶促反应和全自动合成装置制备^{13}N-氨基酸可用于氨基酸代谢及肿瘤诊断。

第十二节　铀

自然界中天然存在的铀是铀的多种同位素的混合物，其中铀-238占99.28%，铀-235占0.71%，其余为铀-234。

一、核素类型

铀-234不会发生核裂变，铀-238在通常情况下也不会发生核裂变，而铀-235这种同位素原子能够轻易发生核裂变，因此，被用来充当核电站内反应堆燃料以及原子弹的"素材"。

铀-235(U-235)是铀的3种同位素之一，当中只有铀-235能够发生核裂变，引发连锁核裂变反应，可用做核电及核弹。这是自然界至今唯一能够裂变的同位素，当最少一个中子攻击铀-235时，连锁核裂变将会产生。铀-235需要到达临界质量，连锁核裂变才会持续下去。

在这个过程中，一个中子撞击铀-235原子核后，内部因吸收中子的能量，开始做剧烈的哑铃状震荡，结构终因震荡剧烈而瓦解，产生出2个质量较小的原

子核及放出2~3个新的中子，这些中子又会撞击附近的铀-235原子核，继续发生分裂反应，即所谓“连锁反应”，如图6-8所示。在这个反应后，其产生的原子核及中子总质量较未有反应前低，损失质量会转化成能量；按照相对论，质量变成能量时，其转换关系为“能量=质量×光速的平方”（$E=mc^2$），极小的质量即可变成极大的能量。

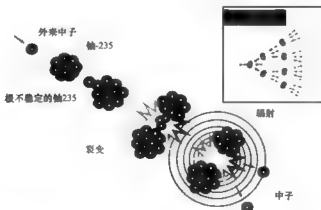


图 6-8　铀-235裂变图

二、衰变方式及能量

^{234}U，半衰期为2.44×10^5 年，自发分裂及α衰变，α粒子的能量为4.773 MeV、4.723 MeV、4.599 MeV，其能量所占比例为72.5%、27.5%、0.35%，产物为^{230}Th。

^{235}U，半衰期为7.1×10^8 年，自发分裂及α衰变，能量为4.401 MeV的α粒子占大多数，产物为^{231}Th。

^{238}U，半衰期为4.51×10^9 年，自发分裂及α衰变，能量为4.196 MeV的α粒子占77%，产物为^{234}Th。

三、铀-235的生产方式

在铀核燃料中铀-235的含量要达到3%以上才能燃烧。因此，开采出来的铀，并不同于开采出来的煤块直接可以用作燃料，它需要经过提纯、浓缩的手续，把铀-235的含量比例提高之后，方能用作燃料。铀-235的含量却又是很低，绝大部分是铀-238，铀-235和铀-238是同一元素的同位素，它们在化学性质上

没有什么差别，只是在质量上有微小差别，相差约1%。因此，要实现铀-235和铀-238分离，把铀-235富集起来，技术上的难度是很大的。提高铀-235浓度（称为富集）的方法现在主要有气体扩散法、高速离心法和激光法。

1. 利用分子扩散的气体扩散法

气体扩散法就是把铀转化成六氟化铀气体，做成高压供料流。当它们通过特制的多孔膜时，质量较轻的铀-235分子运动速度大，容易透过膜；质量较重的铀-238分子运动速度小，不易透过膜。扩散膜要求很高，1 cm^2上有几亿个微孔，要求耐腐蚀和能承受很大的压差。气体扩散法使铀-235和铀-238分离开来，实际上，一次扩散分离的效果是很低的，要将铀-235的浓度从0.71%提高到3%，需要一千多个分离单元串联起来，所以铀扩散工厂是一个庞大的工厂，并且是一个耗电大户。

2. 利用质量差别的气体离心法

离心法是将铀转化成六氟化铀气体后做供料，注入高速离心机。离心机的转速很高，每分钟的转速超千转。在高速旋转离心力的作用下，质量较重的铀-238甩向离心机转筒的壁面附近，质量较轻的铀-235，聚集在转筒中心轴线附近。这样，铀-235和铀-238得到了分离。因为单台离心机的生产量是很小的，需要许多台离心机串联起来使用，才能获得满足需要的分离产品。

离心法比扩散法耗电少，经济性高，设备使用寿命长，已在逐渐替代扩散法富集铀-235。预计2010—2015年，气体离心技术将取代气体扩散技术。美国开发的第五代离心机转子高达15 m，直径达76.2 cm，转速达到10 000 r/min，单机生产能力为400~600 kgSWU/a。

3. 利用光谱差别的激光法

激光法是根据铀-235和铀-238原子（或分子）吸收光谱的微小差别来实现分离的。激光法分为原子激光法和分子激光法，前者直接浓缩金属铀蒸气，而后者则是对六氟化铀气体进行分离。目前，原子激光法开发比较成熟。

原子激光法是将金属铀熔化，蒸发形成原子蒸气束，用特定的激光与铀原子蒸气束相作用，有选择性地激发铀原子。铀-235原子被激发电离，形成等离子体，铀-238原子不被激发。受激发的铀-235在电场作用下发生偏转，将其引出来，收集在精料板上。铀-238原子不被激发，仍为中性，收集在贫料板上，这样实现铀-235和铀-238的分离。

激光法分离铀同位素是新开发的技术，具有分离系数高、耗电少、生产灵活、分离级数少、工厂规模小等优点，现在正向工业化应用发展。

四、应用领域

1.工业领域

铀用作核燃料，铀-235的化合物六氟化铀是铀的唯一稳定的气态化合物，广泛用于铀同位素分离厂的供料。

把铀-235同铀-238分离开来（这是一个相当艰巨的任务），并且用铀-235来建造一个原子核反应堆，这时，构成反应堆燃料的那些铀-235原子就会发生裂变，并向四面八方发射出无数慢中子。如果这个反应堆包着一个用普通铀（其中绝大部分是铀-238）制成的外壳，那么，射人这个外壳的中子就会被铀-238所吸收。这些中子不可能迫使铀-238发生裂变，但却会使铀-238发生另外的变化，最后就会产生钚-239。如果把这些钚-239从铀里面分离出来（这是个相当容易完成的任务），它们就可以用做实用的核燃料了。能够用这种方式产生新燃料去代替用掉的燃料的反应堆就是增殖反应堆。一座设计得当的增殖反应堆所生产的钚-239，在数量上要多于消耗掉的铀-235。

2.科学领域

铀-238经8次α衰变和6次β衰变，最终衰变为铅-206；铀-235经7次α衰变和4次β衰变，最终衰变为铅-207。由于铀放射系和锕铀放射系的各中间成员的半衰期与其始祖同位素铀-238和铀-235的半衰期相比要短得多，因此对于年龄测定来说，可以把铀看做是直接衰变成了铅。于是，通过岩石中铀-238的量和铅-206的量的测定，或通过其中铀-235的量和铅-207的量的测定，就可根据年龄公式方便地计算出岩石（或矿物）的年龄。这种年龄测定法基于铀量和铅量的测定，所以称为铀—铅法。

铀衰变成铅时，放出的α粒子就是氦的原子核，它们捕获两个电子就成了氦原子。因此，通过岩石（或矿物）中铀量和氦量的测定，也可以把年龄计算出来。这种方法叫做氦法。

另外，铀-238和铀-235这两个同位素目前在岩石（或矿物）中的比值是恒定的（为137.8），根据简单的推导可知，只要知道了铅-206和铅-207的比值，也就可以计算出年龄来。这种年龄测定法不需测铀，只需测铅，所以称为铅法。

以上是铀—铅法、氦法和铅法的一般原理，在实际测定年龄时，当然还要考

虑一些复杂的情况，例如在岩石(或矿物)形成时，可能原来就含有一些铅或氦，铀、铅或氦在各地质时期有可能丢失或加进等等，这些因素都必须用适当的方法加以修正。铀在地壳中广泛分布，存在于多种岩石中，所以基于铀的年龄测定法适应性很强。

铀-234是铀放射系的一个中间成员，它在天然铀中只含约0.0055%。不过铀-234在地壳中的总量比某些稳定元素，如氙在地壳中的总量还多，与稳定同位素铼-185差不多，比金只低一个数量级。由于铀-234的性质很平常，很长时间内没发现它有什么实际用途。但近年来，在年龄测定方面却找到了它的应用价值。

同位素年龄测定法要求放射性同位素的半衰期与欲测对象的年龄相当，由于这个原因，一百万年左右的年龄数据一直很缺乏。铀-234的半衰期约为25万年，所以铀-234的年龄测定法正好可以填补这一空白，现在这方面已经取得不少成果。

铀-238及铀-235除了发生α衰变外，还发生自发裂变。它的自发裂变半衰期约为一亿亿年。自发裂变产生的裂变碎片会使晶格发生损伤，通过适当的化学处理可使之显露出来，一般称之为裂变径迹。借助于显微镜或甚至凭肉眼测定矿物或其他样品的径迹密度，就可以计算出年龄来，称为裂变径迹法。

由于裂变径迹法可对单个径迹进行计数，所以它有一个突出的优点，就是测量范围很广，既能测定长至几十亿年的年龄，又能测定短至几百年的年龄。我国科学工作者就用这种方法首次对北京猿人的用火年龄进行了成功的测定。

3.军事应用

核材料铀-235是原子弹的核心材料，原子弹是用铀-235核材料产生的原子裂变时放出大量能量而产生激烈核爆炸，没有铀-235，原子弹是无法制造出来的。

贫铀实际是从天然铀中提取供核武器装料或核反应堆核燃料用铀-235后的废料，仍是100%的铀，其中99%以上是铀-238，铀-235含量一般为0.2%~0.3%，放射性约为天然铀的50%左右。因其主要成分是具有低水平放射性的铀-238，故称贫化铀，简称贫铀。

贫铀，英文简写为DU，是一种主要由铀-238构成的物质，为核燃料制程中的的副产物，故也是一种核废料。自然界中的铀，含有约99.27%的铀-238，

0.72%的铀-235及0.005 5%的铀-234，铀-235可用于核子反应炉或核武器中的核裂变反应材料，但必须先将浓度提高成为浓缩铀才能使用，而在浓缩过程中排出的铀-235浓度更低的废料部分，就称为贫铀，其中铀-235和铀-234的浓度大约只有天然铀的1/3，放射性约为天然铀的60%。贫铀也有产生于已使用核燃料的再处理，但这类贫铀会含有铀-236。

贫铀的密度高达19.1 g/cm^3，与钨相近，可作为飞行器的配重块，或放射线疗法及工业用放射造影器材的屏蔽物及放射性物质使用的货箱。军事上则常用作穿甲弹或装甲板的材料，对于贫铀穿甲弹的使用，由于威胁其潜在的长期健康而有争议性，包括肝、肾、心脏、脑等许多器官都可能受到放射性的影响。由于其微弱的放射性，铀被视为有毒金属，贫铀的毒性较汞等重金属为低，但具有很长的半衰期。贫铀可能被吃、喝或吸入人体，由贫铀弹冲击物体而爆发时产生的气胶，可能散布污染广大的面积，而被人吸入体内。在2003年美国对伊拉克的攻击行动中，3周内估计使用了超过1 000 t的贫铀弹，大部分都在市区。没有决定性的资料显示某些人的健康问题与贫铀的关联，但人工培养细胞与实验室动物的研究显示出其慢性效应造成白血病、基因疾病、神经疾病等的可能性。

第十三节　钍

钍在地壳中的平均含量为1.2×10^{-3}%，其总量约为1.3×10^{10}~1.8×10^{10} t。以钍为主要成分的独立矿物为数不多，如钍石($ThSiO_4$)和方钍石(ThO_2)。钍和稀土元素常共生于矿物中(如独居石)。

目前，核燃料原料的勘探、开发和应用主要是铀矿的开发。但是，由于钍与铀相比，具有很多独有的特点和优越性。如：①钍燃料循环周期更长，只产生低发射性的核废料，乏燃料具有较小的放射性毒性，产生更少的长寿命锕系元素；②^{232}Th的热中子吸收界面大约是^{238}U的3倍，在热中子反应堆中容易获得更高的转化比，^{232}Th是更好的可裂变材料；③对于容易裂变核素^{233}U，在很宽的热中子能谱中，每吸收一个中子放出的中子数达到2个以上，因此，^{232}Th-^{233}U燃料循环体系在快中子、超热中子和热中子能谱下都有可能实现核燃料的增值；④

钍的氧化物比铀的氧化物具有更好的化学稳定性和抗辐照性能；⑤ThO_2具有化学稳定性，不容易被氧化，而UO_2更容易被氧化成U_3O_8和UO_3，因此，乏燃料的储藏和永远处置可不必考虑氧化问题而变得简单了；⑥钍的储量比铀的大3倍以上，所以应用前景是很广阔的。

一、钍矿的特点及勘探方法

1. 钍矿的特点

钍矿是可以单独的，也可以是共生的，它具有：

(1)放射性。

(2)射气现象。钍可以析出放射性氡-220(钍射气)，半衰期约55.6 s。氡是自然界中天然存在的具有α放射性的气体，也是人类生活空间中天然存在的主要气态放射性核素。当他们在环境空气中的浓度达到某一定值后，可直接危害人们的健康，是国际公认的危害公众的重要核素。因此，对氡的测量和防护应给予高度的重视。

(3)具有重金属性质。

2. 钍矿的勘探方法

钍矿的勘探方法除一般的地质方法外(如槽探、坑探、钻探，对地层、岩石和矿物的研究等)，主要应用放射性物探方法。在普查过程中，常用的有航空γ测量以及地面γ测量和地表氡气测量等。此外，还有地球化学法和生物地球化学法等，还可以用稀土找矿方法进行勘探。

二、钍矿的开采和加工

1. 钍矿的开采特点

因为钍矿具有α、β、γ放射性，特别是能释放放射性气体氡及一系列放射性子体，所以其开采较普通矿产的开采增加了较为严密的辐射防护措施。无论是露天开采还是地下开采都必须具备完整的6大系统：通风系统、提升运输系统、供排水系统、供电系统、通信调度系统和安全生产保障系统。此外，还有辐射防护体系和应急救险保障体系等。钍矿主要用露天采矿法开采，但也有少数钍矿石在井下开采。

钍矿的主要开采工艺流程为：辐射取样编录—γ测量—采矿设计—凿岩爆破—矿石检查—放射性分选—运输和“三废”处理。

2. 钍矿加工

矿砂里的钍首先用物理方法进行初分离，即先用湿法处理，干燥后进行磁化分离和静电分离及烘干。为了回收稀土元素和钍金属，分离后的富钍矿物再进一步处理，其工艺与铀的加工相似，进一步细磨后，用碱法进行分解、硝酸浸出等化学加工。由于目前对钍的需求量很小，所以独居石矿砂的加工处理主要是为了提取稀土元素，钍基本保留在处理提取稀土后的独居石尾矿中。

三、钍矿的开采和加工在选址、设计、建造、运行、退役等阶段的一般安全与辐射安全

1. 开采各阶段的安全要求

(1)设计。矿井安全和防护设施的设计必须达到国家规定的各项内外环境卫生指标要求，即矿井空气中有害物浓度必须达标；矿井小气候条件达到卫生要求；矿井有完整的进出风系统；矿井辐射水平满足GB 18871—2002的标准要求；满足矿山“三废”排放标准要求；矿井有完备可靠的排水系统；矿井有安全可靠的两个以上的出入地表的通道；矿井各种提升运输系统、供电系统、通信系统、“三废”处理系统必须安全可靠，必要的话，还应设有备用电源。

(2)建造。必须保证施工安全，确保工程质量，防止冒顶塌方，防止淹井，做好临时通风，防止井下放射性气体超标，杜绝中毒事故和超剂量事故的发生。

(3)运行。必须防止：①通风故障，以免造成矿井通风不畅，致使矿井放射性气体浓度猛增，造成炮烟中毒和超剂量发生；②排水故障，以免造成淹井事故；③冒顶、塌方事故，以免造成人员伤亡和封路堵塞，造成超剂量事故；④火灾、水灾和爆炸等事故。

(4)退役。采空区可能造成地表塌陷，危害人类和建筑物的安全。废石场垮塌，造成对地表、河流、村庄的破坏。矿坑水溢出，造成对水体、地表农田的污染。矿井及废石堆析出氡及氡子体污染环境。

2. 加工各个阶段的安全要求

选址、设计和建造。选冶厂及尾矿库的选址应远离城镇，与居民点保持有足够的防护监测距离，以减少和避免环境及公众的影响。

厂房内工艺设备、工艺过程产生的辐射和“三废”，特别是放射性气体，会对工人造成危害和对环境造成污染。因此，钍矿的加工厂房要进行密闭、通风和净化，设计要考虑工艺化工原材料的毒性对工人的危害，以及生产过程中产生

各类射线对工人的危害，同时要考虑对排放“三废”的治理问题，控制其对环境的影响。

钍矿加工后的尾矿以及钍选冶后的尾矿都会对工作人员和公众产生照射，并对环境造成辐射影响。因此要给予高度重视。提高选冶工艺和运行的机械化和自动化水平，并减少工艺过程事故的发生，都可减少工人的直接接触和降低受照剂量水平。

运行——加强运行过程的管理，防止“跑、冒、滴、漏”，减少环境污染。加强对空气过滤设备的管理，提高过滤效率，减少放射性气体的外排量，控制对环境的污染。加强对外排废液的管理，控制对环境的污染。

退役——加强对污染废旧设备、管材的管理，防止丢失造成对环境公众的危害。加强对矿石和尾矿的永久性隔离问题，防止含放射性的废物扩散和迁移对环境土地、水体的污染，同时控制氡射气对环境的污染。尾矿垮坝和泥石流的发生也会使放射性废物对环境造成破坏。

第十四节　氟-18

一、记法

氟-18符号为$^{18}_{9}F$，简写为^{18}F。

二、核素类型

氟-18是质量数为18的氟的短寿命人工合成放射性核素。

三、衰变方式

氟-18是以β^+衰变及电子俘获方式进行核衰变。

四、能量

β^+衰变产生的正电子的能量97%为0.633 MeV。

五、半衰期

氟-18半衰期为109.7 min。

六、生产方式

可从回旋加速器中以氦核轰击^{16}O而制得。

七、应用领域

医学领域:用于骨扫描及研究牙科疾病与脑瘤定位诊断等方面。

第十五节　镓-67

一、记法

镓-67符号为$^{67}_{31}Ga$,简写为^{67}Ga。

二、核素类型

镓-67是一种天然放射性同位素。

三、衰变方式

镓-67以电子俘获方式进行核衰变,伴随有γ射线。

镓-67衰变纲图如图6-9所示。

四、能量

γ射线能量复杂,主要为0.093 MeV。

五、半衰期

镓-67的半衰期为78.3 h。

六、生产方式

可从回旋加速器中以质子轰击^{67}Zn、α粒子轰击^{65}Cu及$^{67}Zn(p,n)^{67}Ga$、$^{65}Cu(\alpha,2n)^{67}Ga$而制得。可用于生产放射性核素的加速器有静电加速器、直线加速器和回旋加速器等,但回旋加速器最适用。加速的带电粒子主要是P(质子)、d(氘核)、^{3}He核和α粒子(^{4}He核)4种,束流强度为十几到几百微安。回旋加速器大多采用等时性方位变化场设计,并有不同的类型。紧凑型回旋加速器结构紧凑,设施简便,加速P、d、α、^{3}He能量达15~52 MeV,流强在50~200 μA之间。

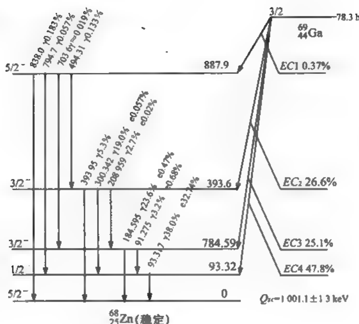


图 6-9 镓-67衰变纲图

七、应用领域

医学应用：^{67}Ga的生物特性类似3价铁离子，静脉注射后主要与转铁蛋白结合成转铁蛋白复合物，经铁蛋白受体进入细胞，沉积于胞浆溶酶体中。主要用于肿瘤与炎症显像，临床上用于诊断和治疗肺部良恶性肿瘤、结节病、心肌炎、乳腺癌等疾病。镓放射性药物有^{67}Ga-cit(枸橼酸镓)。

镓-67注入人体后，大部分与血液中的转铁蛋白相结合，形成转铁蛋白-镓-67大分子复合物，此外还与乳铁蛋白结合形成大分子复合物。镓-67浓集于恶性肿瘤区的机理有以下几种可能：

(1)恶性肿瘤有丰富的血供，可将上述大分子复合物运送至瘤区。

(2)恶性肿瘤区毛细血管通透性高，便于镓-67复合物溢出进入肿瘤。

(3)部分镓-67可被恶性肿瘤细胞摄取。

(4)转铁蛋白和乳铁蛋白可能利于镓-67而积聚和滞留。

镓-67同样也可在炎症病灶积聚，主要是由于炎性细胞和细菌能摄取镓-

67，此外，炎症部位血管增生及通透性增高亦能增加镓-67的积聚。在炎症时，一般注射镓-67在24 h后炎性病灶迅速摄取和浓聚镓-67，但48 h或72 h后，镓-67在炎症部位浓集度很快降低而在恶性肿瘤区则不会降低，其他炎症特征，如局部痛、热、血中白细胞计数增高等均可与恶性肿瘤相区别。

第十六节 镓-68

一、记法

镓-68符号为Ga，简写为^{68}Ga。

二、核素类型

镓-68是一种人工放射性同位素。

三、衰变方式

镓-68是以β^+衰变及电子俘获方式进行核衰变。

镓-68衰变纲图如图6-10所示。

四、能量

β^+衰变产生的正电子的能量88%为1.895 MeV。

五、半衰期

镓-68的半衰期为68.1 min。

六、生产方式

^{68}Ga是^{68}Ge的衰变子核，还可以通过核反应^{68}Zn(p,n)^{68}Ga、^{67}Zn(d,n)^{68}Ga、^{63}Cu(a,n)^{68}Ga得到^{68}Ga。

七、应用领域

医学领域：^{68}Ge-^{68}Ga同位素发生器是由母体核^{68}Ge（$T_{1/2}$为287 d）和子体核^{68}Ga($T_{1/2}$为68 min)组成。它具有母体半衰期长，便于长期使用，子体核是正电子发射，在医学诊断中可采用正电子扫描来提高确诊率，以及子体核半衰期短以降低病人所受的辐射剂量等优点。因此，它越来越受到医学部门的欢迎。

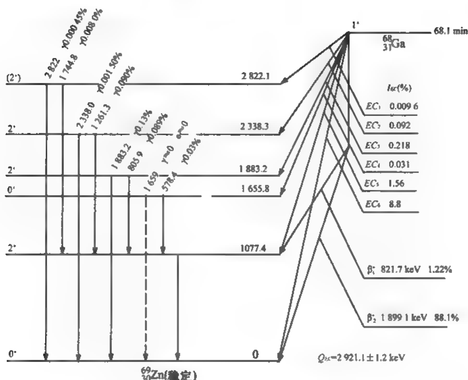


图 6-10 镓-68衰变纲图

第十七节 钚-238

一、记法

钚-238符号为$^{238}_{94}$Pu，简写为^{238}Pu。

二、核素类型

钚-238是一种放射性元素，是原子能工业的重要原料。

三、衰变方式

钚-238主要进行α衰变。

钚-238衰变纲图如图6-11所示。

图 6-11 钚-238衰变纲图

四、能量

钚-238产生的α粒子的能量很多,其中能量为5.499 2的α粒子占71.1%。

五、半衰期

钚-238的半衰期为87.74 年。

六、生产方式

钚的大规模制备是通过反应堆中的核反应进行的，由铀-238 吸收中子后生成,再用溶剂萃取和离子交换纯化。

在沥青铀矿和独居石中有少量存在。用金属钙还原三氟化钚(自铀燃料经溶剂萃取而得)可制得金属钚。

七、应用领域

1. 工业领域

钚是易裂变的放射性元素,能用作核燃料,用于制造核武器。钚用做快中子

增殖反应堆燃料时，新形成的钚比消耗的钚还要多，可使铀-238转变为钚而加以充分利用。钚-238用于制造同位素电池，用做宇宙飞船、人造卫星、航标灯的电源。

2. 医学领域

钚-238可以应用于起搏器。

第十八节　钚-239

一、记法

钚-239符号为$^{239}_{94}Pu$，简写为^{239}Pu。

二、核素类型

钚-239是一种放射性元素，是原子能工业的重要原料。

三、衰变方式

钚-239主要进行α衰变。

四、能量

钚-239产生的α粒子的能量很多，其中能量为5.155 4 MeV的α粒子占73.3%。

五、半衰期

钚-239的半衰期为2.44×10^4年。

六、生产方式

它是通过反应堆中产生的慢中子轰击铀-238人工生产的。中子来源于用天然铀作成的元件中的铀-235。铀-235裂变中子产额为2~3个，这些中子经慢化后会再次引起铀-235裂变。维持这种裂变反应只需一个次级中子就够了，其余的除被慢化剂等吸收掉以外，即可使天然铀的铀-238转化为钚-239。所以，生产堆中的核燃料元件，既是燃料，又是生产钚-239的原料。钚-239是从乏燃料元件中分离出来的。实际上，生产堆的作用，就是烧掉一部分天然铀中的铀-235来换取钚-239，平均烧掉一个铀-235原子，得到0.8个钚-239原子。

天然铀制成的核燃料元件，在生产堆进行燃烧和辐照后，生成钚-239。把它分离出来需送到专用的后处理厂来分离加工，需要把没有“烧”尽的铀分离出来再利用，还需要把钚-239同其他裂变产物分离开。

后处理方法分为湿法和干法两种。干法尚处于研究开发阶段，目前主要应用湿法。湿法又分为沉淀法、溶剂萃取法，离子交换法3种。其中，沉淀法已属陈旧的方法，目前主要应用溶剂萃取法，也称普雷克斯(Purex)流程。其基本原理是利用铀、钚以及裂变产物的不同价态在有机溶剂中有不同的分离系数，将它们一一分开。

钚-239分离出来后，还需要纯化，去除微量杂质，才能作为核武器的装料。

七、应用领域

1. 工业应用

钚-239主要用于生产易裂变材料或其他材料，或用来进行工业规模辐照。它包括产钚堆、产氚堆和产钚产氚两用堆、同位素生产堆及大规模辐照堆。还可以用做刻度源使用。

2. 军事应用

钚-239是核武器重要的核装料。

第十九节　氡

氡是一种放射性元素，是地壳中放射性铀、镭和钍的蜕变产物，是一种惰性气体。符号为Rn。氡的已知同位素有34种，从氡-195到氡-228。最重要的是3个天然放射系中镭的子体^{222}Rn(Radon)、^{220}Rn(Thoron)、^{219}Rn(Actinium emanation)，分别来源于铀系、钍系和锕系3种主要天然放射性衰变系列。而锕系(^{235}U)在自然界中含量很少，仅占^{238}U含量的0.72%，而且由它衰变的^{219}Rn的半衰期更短，所以在空气中几乎显不出它的存在。因此，^{222}Rn是低层大气中天然放射性气体的主要组分。在人们接受的来自天然辐射的剂量中大约50%是由氡及其短寿命衰变子体的贡献，所以^{222}Rn及其子体的生物学危害已引起人们越来越广泛的重视。目前，许多国家都在竞相开展这方面的调查测量和研究工作。

氡-222是氡最稳定的同位素，它是镭-226的衰变物，会放出α粒子来衰变，

半衰期是3.82 d。氡-220是钍的衰变物，又称钍射气(Thoron)，会放出α粒子来衰变，半衰期是55.6 s。氡-219是锕的衰变物，又称锕射气(Actinium emanation)，会放出α粒子来衰变，半衰期是3.96 s。通常所说的氡指^{222}Rn，在讨论室内氡以^{222}Rn为主，^{220}Rn次之。

氡是气体，而其衰变子体却是固体。氡子体既有α辐射，也有β和γ辐射，因此，氡子体是α、β、γ的混合辐射源。

一、最稳定同位素

最稳定同位素见表6-1所示。

表6-1　最稳定同位素表

最稳定的同位素					
同位素	丰度	半衰期	衰变模式	衰变能量/MeV	衰变产物
^{211}Rn	人造	15 h	电子捕获	2.892	^{211}At
			α衰变	5.965	^{207}Po
^{222}Rn	100%	3.82 d	α衰变	5.590	^{218}Po
^{224}Rn	人造	1.9 h	β衰变	0.8	^{224}Fr

二、生产方式

由镭、钍等放射性元素蜕变而获得。

三、应用领域

1. 工业应用

将铍粉和氡密封在管子内，氡衰变时放出的α粒子与铍原子核进行核反应，产生的中子可用做实验室的中子源。氡还可用做气体示踪剂，用于检测管道泄漏和研究气体运动。

2. 医学应用

由于氡具有放射性，衰变后成为放射性钋和α粒子，因此可供医疗用；也可用于癌症的放射治疗。用充满氡气的金针插进生病的组织，可杀死癌细胞。

四、危害

^{222}Rn经α衰变以后，顺序生成的产物是^{218}Po(RaA)、^{214}Pb(RaB)、^{214}Bi(RaC)和

^{214}Po(RaC1)，它们的半衰期都较短，最后的产物是^{210}Pb，半衰期较长为22.3 年。所以，一般主要考虑^{222}Rn和^{218}Po、^{214}Pb、^{214}Bi和^{214}Po对人体的影响。当吸入氡的短寿命子体后不断地沉积在呼吸道表面，在局部区域内不断积累。因此，吸入含氡气体对呼吸道造成的辐射危害，主要来自氡子体，氡子体在呼吸道的沉积率为20%~50%，而沉积率是决定呼吸道上皮组织接受辐射剂量的一个重要因素。由于氡是一种放射性元素，如果长期呼吸高浓度氡气，将会造成上呼吸道和肺伤害，甚至引发肺癌，其潜伏期可长达15~40 年。

氡对人类的健康危害主要表现为确定性效应和随机效应。

1. 确定性效应表现

在高浓度氡的暴露下，集体出现血细胞的变化。氡对人体脂肪有很高的亲和力，特别是氡与神经系统结合后，危害更大。

2. 随机效应表现

随机效应主要表现为肺癌的发生。由于氡是放射性气体，当人们吸入体内后，氡衰变发生的γ粒子可在人的呼吸系统造成辐射损伤，诱发肺癌。专家研究表明，氡是除吸烟以外引起肺癌的第二大因素，世界卫生组织把它列为19种主要的环境致癌物质之一，国际癌症研究机构也认为氡是室内重要致癌物质。

3. 氡–222的主要危害

(1)氡–222是引起肺癌的第二大“杀手”。

(2)氡–222对人体脂肪有很高的亲和力，从而影响人的神经系统，使人精神不振，昏昏人睡。

(3)氡–222还会损害人的造血器官、神经系统、生殖系统和消化系统。

第二十节 镭–226

一、记法

镭–226符号为$^{226}_{88}Ra$，简写为^{226}Ra。

二、核素类型

镭的原子序数是88，原子量226.025 4，是一种天然放射性元素，元素名来源于拉丁文，原意是"射线"。镭是剧毒物质。

三、衰变方式

镭-226在衰变的过程中放出α、γ两种射线。

镭-226衰变纲图如图6-12所示。

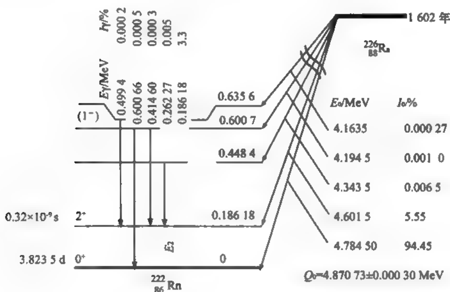


图 6-12　镭-226衰变纲图

四、能量

镭线能谱复杂，平均能量为0.38 MeV。

五、半衰期

镭-226的半衰期为1 602 年。

六、应用领域

镭是现代核工业兴起前最重要的放射性物质，广泛应用于医疗、工业和科研领域；把镭盐和硫化锌荧光粉混匀，可制成永久性发光粉。

1. 医学应用

临床应用的镭是它的硫酸盐，装在各种形状的铂铱合金封套内。铂铱封套具有密封及滤过α、β射线的作用。1 mg镭，经0.5 mm铂铱滤过后，距离镭源1 cm处每小时的照射量为2.13 mC/kg。除少数治疗应用镭的β射线外，一般仅用其γ射线。镭的γ射线能谱复杂，但平均能量0.83 MeV，远比一般的X线高。由于镭获得困难，实际应用的镭量很小，放射强度低，只能作近距离治疗。虽然镭的γ射线有很强的穿透力，但由于短距离所形成的剂量衰减，使得它产生的深部剂量很低，约与接触X线相似，所以临床上多用来做腔内或组织间放疗。

2. 缺陷与不足

用镭作放射源，在防护方面有4大缺点：

(1)镭的能谱复杂，最高能量达3.8 MeV，需要厚的防护层。

(2)半衰期长，遇战争或其他意外，会造成严重污染且影响时间长，若一个局部地区污染，数十年乃至数百年都不能肯定是否能允许居民居住。

(3)衰变过程中产生氡气，操作过程中不小心或其他意外，镭管发生破损，氡气逸出，造成环境污染。

(4)镭的生物半衰期长，体内停留时间长，短时间不能消除，特别是对骨髓损伤严重。因此，原则上镭在医学上应该禁用。

目前，镭已被钴-60、铯-137等人工放射性同位素代替。

第二十一节　氢-3

一、记法

氢-3符号为$^{3}_{1}H$，简写为^{3}H。

二、核素类型

氢-3是氢的一种人工放射性同位素，又名氚。

三、衰变方式

氢-3是β^-衰变核素，发射β^-射线，衰变为^{3}He。

氢-3衰变纲图如图6-13所示。

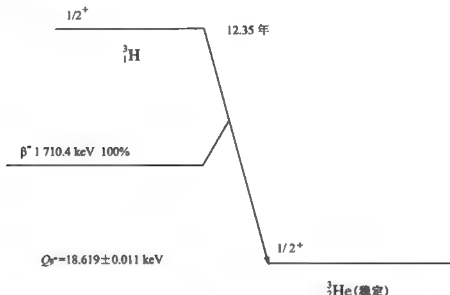


图 6-13 氢-3衰变纲图

四、能量

β^-射线的能量为0.018 61 MeV。

五、半衰期

氢-3的半衰期为12.35 年。

六、生产方式

氢-3可以通过核反应^{6}Li(n,α)^{3}H得到。

氚的生产工艺包括以下几个方面。

1. 靶材料选择

有10多种核反应都能产生氚，但只有^{6}Li(n,α)^{3}H反应具有工业产氚价值，该反应不但适合在裂变堆中生产氚，也适合在聚变堆中生产氚。适合裂变堆生产氚的靶材料主要是含锂材料，如金属锂、锂化合物、陶瓷锂、锂合金（如Li-Mg、Li-Al）等。对靶材料的基本要求是锂含量高、热稳定性好、耐辐射和不产生有害化学反应，最好用富集锂-6。大多数采用富集的锂铝合金作为裂变堆产氚的靶材料。

2. 制靶与辐照

制靶是氚工艺中的重要环节。把制成一定形状的含^{6}Li的材料装人辐照容器后，加热抽负压并充入惰性气体，然后密封。

在反应堆这种^{6}Li俘获热中子，发生核反应，^{6}Li(n,α)^{3}H截面为940 b。1 g天然锂(锂-6丰度为7.5%)在中子注量率$1×10^{15}$ cm^{-2}/s条件下照射1年可产生34 GBq氚。

3. 氚的提取

照射后的靶冷却一段时间后提取氚。为了防止氚向外渗透扩散，原则上需要低压和惰性气体稀释。以下介绍两种从靶中提取氚的方法。

(1)真空提取法：加热辐射过的靶，用负压方法将从靶中释放的氚、氢、惰性气体和其他杂气抽出，通过一个加热到750 ℃左右的铀屑柱，将氧、氮等杂气除去，再经过一个发火铀粉柱，氢和氚被铀粉吸附而惰性气体通过。

(2)氦气载带法：将照射过的靶材料密封在罐中加热熔融，真空提取系统与熔融罐组成一个密封回路。氦气在回路中循环，把融化靶材料中的氚、氢及氧、氮杂气载带出来，通过一个纯化器把氧、氮杂气除去，剩下的氚、氢和氦气通过一钯管。在400 ℃，氚和氢渗透穿过钯管壁后用铀粉吸收，而氦气流过钯管经过回路再回到熔融罐中，直到把氚气全部提取出来。

4. 氚的富集

经过提取，虽已把氧、氮杂气除去，但仍含有大量的氢，只有经过富集才能得到高丰度的氚。氚的富集方法很多，如热扩散法、低温精馏法、电解法、气相色谱法等。

(1)钯石棉柱氢置换法：气相色谱法的一种，其基本原理是以钯石棉作为分离柱的填料，利用氢同位素在钯上吸附的同位素效应实现分离。钯对氢、同位素吸附力的顺序为H>D>T。以氢作为置换气体，对吸附在钯柱入口处的氢、氚混合气体进行置换，在混合气的连续解吸和吸附的过程中氚与氢逐渐分离。在柱末端可收集到高丰度氚。利用此法每次能处理1.5 L混合气，可得到丰度99.6%以上的浓缩氚。

(2)钯石棉柱热置换法：分离原理及过程与氢置换法基本相同。热置换法的特点是不必从柱外额外引入氢，而是由流入柱中的提取所得的氢、氚混合物中的氢进行置换，在开始置换时从柱入口端开始加热，逐步向柱后移动。在柱

子上形成一个向后移动的热界面。在柱入口端被吸附的混合气解吸后向后扩散，再被吸附。在热界面不断向后移动的过程中利用混合气自身的氢进行置换，把氚向柱后推移，最终氚在柱末端被浓集。此法一次处理氢、氚混合气可达28 L，可作为常规方法用于氚的生产中，也可用来处理含氚废气。

(3)热扩散法：如果氢、氚混合气处在一个密封的冷热壁之间，由于热扩散的同位素效应，在冷热壁之间出现同位素浓度梯度分布。利用此原理可以制成一个分离氚、氢的热扩散柱。热扩散柱垂直于地面，在冷壁产生一个向下的气流，浓集的氚沿冷管壁向下移动。在热壁产生一个向上的气流，浓集了的氢沿热壁向上移动。由于热扩散效应加上对流效应，氚的浓缩效应大大提高，在最终达到平衡是氚浓集在柱底而氢浓集在柱顶。一般说来，热扩散柱的分离度与柱长及冷热壁间的温差成正比。为了提高分离效率，经常采用几根柱级联的方式。

5. 氚的测量

在氚生产工艺中氚主要以气体方式存在。常规的测量方法一般为气体电离室和气相色谱法，同时用质谱法和光谱法进行对比测量。

七、应用领域

氢-3可用做氚靶、避雷器等。

第二十二节　钇-90

一、记法

钇-90符号为$^{90}_{39}$Y，简写为^{90}Y。

二、核素类型

钇-90是一种放射性同位素。

三、衰变方式

钇-90发射单纯的β^-射线。

钇-90衰变纲图如图6-14所示。

图 6-14 钇-90衰变纲图

四、能量

β-射线的最大能量2.279 MeV。

五、半衰期

钇-90半衰期为64.1 h。

六、生产方式

钇-90是^{90}Sr的衰变子核，还可以通过核反应^{89}Y(n,γ)^{90}Y得到钇-90。

七、应用领域

^{90}Y外照射治疗皮肤病，是利用放射性核素电离辐射的物理特性，在破坏表皮异常增生的同时，不损伤正常皮肤组织的一种疗法。锶-90—钇-90敷贴治疗先天性皮肤血管瘤安全、简便。

^{90}Y的主要放射性药物^{90}Y-EDTMP、^{90}Y-GTMS分别用于治疗多发转移性骨肿瘤患者的骨性疼痛和肿瘤介入治疗。

第二十三节　磷-32

一、记法

磷-32符号为$^{32}_{15}P$，简写为^{32}P。

二、核素类型

磷-32是元素磷的一种放射性同位素，磷-32的化学性质与元素磷相同。磷-32属中毒性核素，主要亲和骨骼，对人体的有效半衰期为14 d，在人体中的最大容许积存量为1.1×10^6 Bq。

三、衰变方式

磷-32是纯β^-衰变核素。

磷-32衰变纲图如图6-15所示。

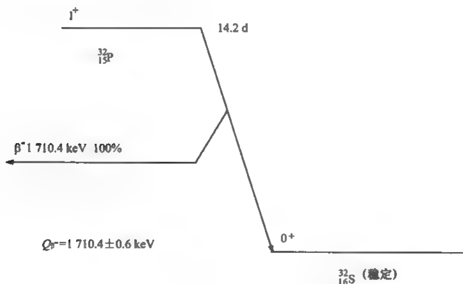


图 6-15　磷-32衰变纲图

四、能量

β^-射线的最大能量为1.709 MeV。

五、半衰期

磷-32的半衰期为14.2 d。

六、生产方式

磷-32是1935年用镭铍中子源照射二硫化碳首次制得的。产生磷-32的主要核反应有$^{31}P(n,\gamma)^{32}P$、$^{32}S(n, p)^{32}P$等。前一种核反应是以含磷靶材料于反应堆中辐照来实现的，反应产生的磷-32混于大量稳定磷-31中，为有载体的磷-32。有载体磷-32的制备工艺比较简单，例如用五氧化二磷(P_2O_5)制成靶子放入反应堆中辐照之后，取出来用热水溶解便能制成有载体的磷(正磷酸)。后一种核反应则是以硫黄制成靶子于反应堆中辐照来实现的，反应生成的磷-32是无载体的。辐照后，通常采用溶剂萃取、色谱法等从辐照过的靶材料中将无载体的磷-32分离出来。

七、应用领域

1. 医学领域

无载体磷-32是最早用于临床的放射性核素之一。它的化合物磷酸钠注射液可用于治疗真性红细胞增多症；胶体磷酸铬注射液可用于控制癌性腹水和作某些恶性肿瘤的辅助治疗。用有载体磷-32制成的敷贴器可用于治疗某些皮肤病，如神经性皮炎、毛细血管瘤、慢性湿疹等。

2. 农业领域

磷-32可用做示踪原子，研究植物的营养吸收、分布和代谢机理，研究农药的吸收、转运、积累、降解、残留、排除等的规律，为合理施肥、农药选择和安全使用提供科学依据。

3. 生物学领域

在生物学遗传工程研究中，高比活度的(γ-^{32}P)腺苷三磷酸和(α-^{32}P)丙二胺四乙酸则是测定核酸分子序列和“缺口翻译”非常重要的制剂。

八、锶-90与磷-32治疗疮病的优缺点

1. 共同点

将一定剂量的发射β^-射线的放射性核素作为外照射源紧贴于病变部位，通过β^-射线对病灶产生电离辐射生物效应，以达到治疗目的。β^-射线敷贴器就是根据这一原理设计的。

2. 锶-90治疗仪

锶-90治疗仪是一块约2 cm×2 cm的金属块，有方的也有圆的，由医院严格保管控制，只在治疗时拿出来。

治疗过程：锶-90治疗的时候只是把带有手柄的金属块按压在疤痕疙瘩的表面而已，持续3~5 min即可，每天1次，连续5 d。如果疙瘩面积超过仪器面积，就要增加1次覆贴，锶-90只对覆贴到的皮肤起作用。整个过程无任何感觉。

锶-90治疗仪的治疗特点。

(1)优点：治疗过程无痛苦，价格便宜，不反弹，尤其对规定范围内最有效。

(2)缺点：对厚度3 mm内的疙瘩治疗效果最好，太厚也不行。疤痕面积超过敷贴器的面积，就需要增加敷贴，并且增加敷贴的面积并不能准确掌握，容易造成重复敷贴的位置。一个疗程的治疗每天都要去医院，这对于上班一族来说，也有一定的影响。

3. 磷-32敷贴器

^{32}P敷贴器一般为临时制作，取厚薄与密度均匀的高级滤纸，剪成与病变大小一致的形状作为支撑物，将所需放射性强度的^{32}P溶液用适量蒸馏水或生理盐水稀释混匀，均匀地涂在滤纸上，用红外线灯烤干或晾干，装于塑料薄膜袋中密封备用。平时不是医院保管药物，患者必须提早去医院预定。医院根据患者的预订数量进行订购，保存期一般为1周时间最有效果。

治疗过程：将制备好的敷贴器按病损形状对齐紧贴并用医用胶布固定，敷贴一定时间达到预计的照射剂量后应当立即除去敷贴器，切不可随意增加或减少敷贴时间。敷贴期间只是两个星期不沾水。整个过程没有痛苦。

磷-32敷贴器的治疗特点。

(1)优点：一次性治疗，疤痕敷贴位置准确固定，不会出现重复敷贴造成剂量过大的情况，也不用天天跑医院那么浪费时间。第一次治疗后马上会止痒止痛。

(2)缺点：一定要坚持敷贴到疤痕变平变白后才能停止治疗，如果中间停止

了，会有复发的现象出现。

第二十四节 铱-192

一、记法

铱-192符号为$^{192}_{77}Ir$，简写为^{192}Ir。

二、核素类型

铱-192也是一种人工放射性同位素，它是由铱-191在原子反应堆中经热中子轰击而生成的不稳定的放射性同位素。

三、衰变方式

铱-192发射γ射线和β⁻射线。

铱-192衰变纲图如图6-16所示。

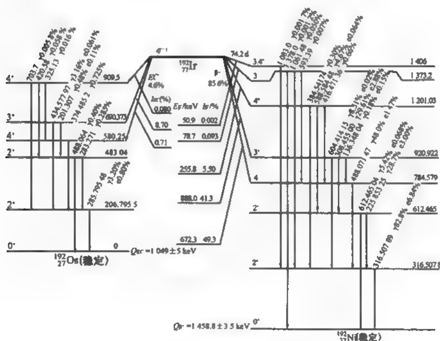


图 6-16 铱-192衰变纲图

四、能量

铱-192能谱比较复杂，γ能量0.206~0.612 MeV，平均能量为350 keV；β^-能量主要为0.627 MeV和0.536 MeV。

五、半衰期

铱-192的半衰期为74.2 d。

六、生产方式

铱-192是在核反应堆中照射含有铱-191和铱-193的铱丝、圆片或大块而得到的。

铱-192γ源的制备：在反应堆中用中子照射^{191}Ir可制成^{192}Ir。核反应如图6-17所示。

^{192}Ir γ源的优点是成产比较容易，且可获得高的比活度。由于金属铱很硬，加工较困难，现场采用Ir-Pt合金作靶子，辐照后用氩弧焊技术封装在不锈钢源壳内。γ照相探伤用^{192}Ir源使用点源（活性区直径为0.5~4 mm）。医用后装机中采用的是^{192}Ir细管状源（活性区直径为1~2 mm，长度为5~10 mm）。组织间治疗时常用丝状源（直径为0.3 mm）或发夹源（直径为0.65 mm）。

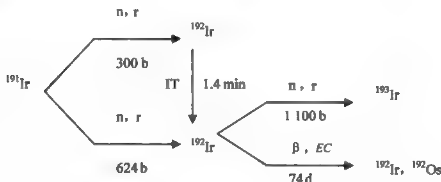


图 6-17　铱-192核反应图

七、应用领域

1. 工业领域

放射性同位素铱-192源的出现，使便携式γ探伤机在工业中得到了广泛的应用。铱-192 γ探伤机由于γ射线能量适中，放射源比活度高，因而在常见的材

料厚度下具有较高的探伤灵敏度。这种探伤机不需电源、不需冷却水、照射头体积小，极适于现场与野外应用。主要用于石油管线、钻井和其他关键工程结构的探伤中以及癌症的放射疗法中，特别是在球罐等一类压力容器焊缝检测时，由于铱-192 γ探伤机可实现360°一次全景曝光，因而大大提高了探伤效率，节省了人力、物力和财力，是其他无损检测手段所无法取代的。目前铱-192 γ探伤机一般采用贫铀或钨作为屏蔽材料，并以S通道为结构形式，使机体重量大大减轻，便于携带，有利于专业人员开展广泛的γ探伤服务。

2. 医学领域

铱-192近距离腔内可治疗鼻咽、食管、肺、乳腺、胰腺、宫腔、宫颈、脑、前列腺等部位的肿瘤。近距离治疗的特点是肿瘤局部受放射剂量高，周围剂量衰减梯度大，故正常组织所受放射剂量很低。铱-192近距离腔内治疗食管癌有提高局部控制率，改善生存质量，延长生存期等良好的效果，有些病例尤其是早期病例可得以根治，具有操作简便的优点。

铱-192粒状源可以做得很小，使其点源的等效性好，便于剂量计算，加之半衰期为74 d，铱-192是较好地用于高剂量率的组织间插植和腔内照射的放射源。

第二十五节　镱-169

一、记法

镱-169符号为$^{169}_{70}Yb$，简写为^{169}Yb。

二、核素类型

镱-169是一种人工合成稀土元素。

三、衰变方式

镱-169发生衰变的方式为轨道电子俘获。

镱-169衰变纲图如图6-18所示。

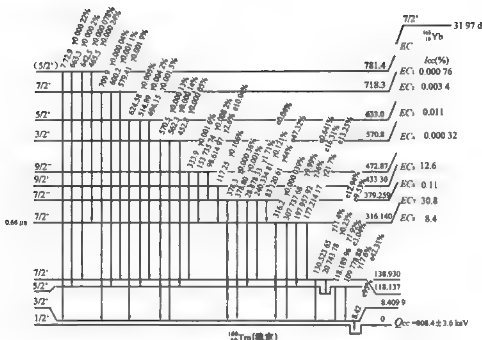


图 6-18 镱-169衰变纲图

四、半衰期

镱-169的半衰期为31.97 d。

五、生产方式

在某些矿石中与钇及其他有关元素共存(如磷钇矿、硅铍钇矿),二价镱形成绿色盐,三价镱为无色盐。在核反应中照射^{169}Tm生成^{170}Tm,半衰期为129 d,这个同位素可发射出很强的X射线,常由氧化镱(Yb_2O_3)用钙还原而制得。

六、应用领域

镱-169可以加强核磁共振影像。其原理为:利用自旋弛豫时间差异,加入顺磁的稀土离子作为试剂,可增加两个邻近组织的对比度,更好地改善肾、肝、胃肠道等器官图像,增强核磁共振影像。稀土中又以钆离子的性能最好,如常规采用DTPA钆作为核磁共振显像的造影剂时,具有DTPA钆配合物可以自由扩散、无交换作用、稳定系数大、无毒、可很快经尿排出体外等优点,可用作大脑

肿瘤、膀胱癌的图像对比度加强剂，也常用于脑损伤和大脑梗塞等方面的诊断以及肾、脾、心肌缺血、损伤、肾盂造影等方面。

用^{169}Yb EDTA作为显影剂具有的优点是半衰期较长，可以作较长时间的追踪观察，并便于储存和在疑难病急诊确诊时使用。临床常常将^{169}Yb EDTA注射于脑室、脑池和鞘内，用于脑积液显像；还可用于观察病人肾功能状况，如将其注射于血液中，通过检测血中放射性强度，计算肾有效血流量和肾小球滤过率。

附录A

放射源的分类

根据国务院第449号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》规定，制定本放射源分类办法。

一、放射源分类原则

参照国际原子能机构的有关规定，按照放射源对人体健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类，Ⅴ类源的下限活度值为该种核素的豁免活度。

(1)Ⅰ类放射源为极高危险源。没有防护情况下，接触这类源几分钟到1小时就可致人死亡。

(2)Ⅱ类放射源为高危险源。没有防护情况下，接触这类源几小时至几天可致人死亡。

(3)Ⅲ类放射源为危险源。没有防护情况下，接触这类源几小时就可对人造成永久性损伤，接触几天至几周也可致人死亡。

(4)Ⅳ类放射源为低危险源。基本不会对人造成永久性损伤，但对长时间、近距离接触这些放射源的人能造成可恢复的临时性损伤。

(5)Ⅴ类放射源为极低危险源。不会对人造成永久性损伤。

二、放射源分类表

常用不同核素的64种放射源按进行分类，见表A-1所示。

表A-1　放射源分类表

核素名称	Ⅰ类源 /Bq	Ⅱ类源 /Bq	Ⅲ类源 /Bq	Ⅳ类源 /Bq	Ⅴ类源 /Bq
Am-241	$\geqslant 6\times10^{13}$	$\geqslant 6\times10^{11}$	$\geqslant 6\times10^{10}$	$\geqslant 6\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Am-241/Be	$\geqslant 6\times10^{13}$	$\geqslant 6\times10^{11}$	$\geqslant 6\times10^{10}$	$\geqslant 6\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Au-198	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{12}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 2\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Ba-133	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{12}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 2\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
C-14	$\geqslant 5\times10^{16}$	$\geqslant 5\times10^{14}$	$\geqslant 5\times10^{13}$	$\geqslant 5\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{7}$
Cd-109	$\geqslant 2\times10^{16}$	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{13}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Ce-141	$\geqslant 1\times10^{15}$	$\geqslant 1\times10^{13}$	$\geqslant 1\times10^{12}$	$\geqslant 1\times10^{10}$	$\geqslant 1\times10^{7}$
Ce-144	$\geqslant 9\times10^{14}$	$\geqslant 9\times10^{12}$	$\geqslant 9\times10^{11}$	$\geqslant 9\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{5}$
Cf-252	$\geqslant 2\times10^{13}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 2\times10^{10}$	$\geqslant 2\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Cl-36	$\geqslant 2\times10^{16}$	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{13}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Cm-242	$\geqslant 4\times10^{13}$	$\geqslant 4\times10^{11}$	$\geqslant 4\times10^{10}$	$\geqslant 4\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{5}$
Cm-244	$\geqslant 5\times10^{13}$	$\geqslant 5\times10^{11}$	$\geqslant 5\times10^{10}$	$\geqslant 5\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Co-57	$\geqslant 7\times10^{14}$	$\geqslant 7\times10^{12}$	$\geqslant 7\times10^{11}$	$\geqslant 7\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Co-60	$\geqslant 3\times10^{13}$	$\geqslant 3\times10^{11}$	$\geqslant 3\times10^{10}$	$\geqslant 3\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{5}$
Cr-51	$\geqslant 2\times10^{15}$	$\geqslant 2\times10^{13}$	$\geqslant 2\times10^{12}$	$\geqslant 2\times10^{10}$	$\geqslant 1\times10^{7}$
Cs-134	$\geqslant 4\times10^{13}$	$\geqslant 4\times10^{11}$	$\geqslant 4\times10^{10}$	$\geqslant 4\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Cs-137	$\geqslant 1\times10^{14}$	$\geqslant 1\times10^{12}$	$\geqslant 1\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Eu-152	$\geqslant 6\times10^{13}$	$\geqslant 6\times10^{11}$	$\geqslant 6\times10^{10}$	$\geqslant 6\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Eu-154	$\geqslant 6\times10^{13}$	$\geqslant 6\times10^{11}$	$\geqslant 6\times10^{10}$	$\geqslant 6\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Fe-55	$\geqslant 8\times10^{17}$	$\geqslant 8\times10^{15}$	$\geqslant 8\times10^{14}$	$\geqslant 8\times10^{12}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Gd-153	$\geqslant 1\times10^{15}$	$\geqslant 1\times10^{13}$	$\geqslant 1\times10^{12}$	$\geqslant 1\times10^{10}$	$\geqslant 1\times10^{7}$
Ge-68	$\geqslant 7\times10^{14}$	$\geqslant 7\times10^{12}$	$\geqslant 7\times10^{11}$	$\geqslant 7\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{5}$
H-3	$\geqslant 2\times10^{18}$	$\geqslant 2\times10^{16}$	$\geqslant 2\times10^{15}$	$\geqslant 2\times10^{13}$	$\geqslant 1\times10^{9}$
Hg-203	$\geqslant 3\times10^{14}$	$\geqslant 3\times10^{12}$	$\geqslant 3\times10^{11}$	$\geqslant 3\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{5}$
I-125	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{12}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 2\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
I-131	$\geqslant 2\times10^{14}$	$\geqslant 2\times10^{12}$	$\geqslant 2\times10^{11}$	$\geqslant 2\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Ir-192	$\geqslant 8\times10^{13}$	$\geqslant 8\times10^{11}$	$\geqslant 8\times10^{10}$	$\geqslant 8\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Kr-85	$\geqslant 3\times10^{16}$	$\geqslant 3\times10^{14}$	$\geqslant 3\times10^{13}$	$\geqslant 3\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{4}$
Mo-99	$\geqslant 3\times10^{14}$	$\geqslant 3\times10^{12}$	$\geqslant 3\times10^{11}$	$\geqslant 3\times10^{9}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Nb-95	$\geqslant 9\times10^{13}$	$\geqslant 9\times10^{11}$	$\geqslant 9\times10^{10}$	$\geqslant 9\times10^{8}$	$\geqslant 1\times10^{6}$
Ni-63	$\geqslant 6\times10^{16}$	$\geqslant 6\times10^{14}$	$\geqslant 6\times10^{13}$	$\geqslant 6\times10^{11}$	$\geqslant 1\times10^{8}$

续表A-1

核素名称	I 类源 /Bq	II 类源 /Bq	III 类源 /Bq	IV 类源 /Bq	V 类源 /Bq
Np-237 (Pa-233)	$\geq 7\times10^{13}$	$\geq 7\times10^{11}$	$\geq 7\times10^{10}$	$\geq 7\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{3}$
P-32	$\geq 1\times10^{16}$	$\geq 1\times10^{14}$	$\geq 1\times10^{13}$	$\geq 1\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{5}$
Pd-103	$\geq 9\times10^{16}$	$\geq 9\times10^{14}$	$\geq 9\times10^{13}$	$\geq 9\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{8}$
Pm-147	$\geq 4\times10^{16}$	$\geq 4\times10^{14}$	$\geq 4\times10^{13}$	$\geq 4\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{7}$
Po-210	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 6\times10^{10}$	$\geq 6\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Pu-238	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 6\times10^{10}$	$\geq 6\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Pu-239/Be	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 6\times10^{10}$	$\geq 6\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Pu-239	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 6\times10^{10}$	$\geq 6\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Pu-240	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 6\times10^{10}$	$\geq 6\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{3}$
Pu-242	$\geq 7\times10^{13}$	$\geq 7\times10^{11}$	$\geq 7\times10^{10}$	$\geq 7\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Ra-226	$\geq 4\times10^{13}$	$\geq 4\times10^{11}$	$\geq 4\times10^{10}$	$\geq 4\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Re-188	$\geq 1\times10^{15}$	$\geq 1\times10^{13}$	$\geq 1\times10^{12}$	$\geq 1\times10^{10}$	$\geq 1\times10^{5}$
Ru-103 (Rh-103m)	$\geq 1\times10^{14}$	$\geq 1\times10^{12}$	$\geq 1\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{6}$
Ru-106 (Rh-106)	$\geq 3\times10^{14}$	$\geq 3\times10^{12}$	$\geq 3\times10^{11}$	$\geq 3\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{5}$
S-35	$\geq 6\times10^{16}$	$\geq 6\times10^{14}$	$\geq 6\times10^{13}$	$\geq 6\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{8}$
Se-75	$\geq 2\times10^{14}$	$\geq 2\times10^{12}$	$\geq 2\times10^{11}$	$\geq 2\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{6}$
Sr-89	$\geq 2\times10^{16}$	$\geq 2\times10^{14}$	$\geq 2\times10^{13}$	$\geq 2\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{6}$
Sr-90 (Y-90)	$\geq 1\times10^{15}$	$\geq 1\times10^{13}$	$\geq 1\times10^{12}$	$\geq 1\times10^{10}$	$\geq 1\times10^{4}$
Tc-99m	$\geq 7\times10^{14}$	$\geq 7\times10^{12}$	$\geq 7\times10^{11}$	$\geq 7\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{7}$
Te-132 (I-132)	$\geq 3\times10^{13}$	$\geq 3\times10^{11}$	$\geq 3\times10^{10}$	$\geq 3\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{7}$
Th-230	$\geq 7\times10^{13}$	$\geq 7\times10^{11}$	$\geq 7\times10^{10}$	$\geq 7\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{4}$
Tl-204	$\geq 2\times10^{16}$	$\geq 2\times10^{14}$	$\geq 2\times10^{13}$	$\geq 2\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{4}$
Tm-170	$\geq 2\times10^{16}$	$\geq 2\times10^{14}$	$\geq 2\times10^{13}$	$\geq 2\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{6}$
Y-90	$\geq 5\times10^{15}$	$\geq 5\times10^{13}$	$\geq 5\times10^{12}$	$\geq 5\times10^{10}$	$\geq 1\times10^{5}$
Y-91	$\geq 8\times10^{15}$	$\geq 8\times10^{13}$	$\geq 8\times10^{12}$	$\geq 8\times10^{10}$	$\geq 1\times10^{6}$
Yb-169	$\geq 3\times10^{14}$	$\geq 3\times10^{12}$	$\geq 3\times10^{11}$	$\geq 3\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{7}$
Zn-65	$\geq 1\times10^{14}$	$\geq 1\times10^{12}$	$\geq 1\times10^{11}$	$\geq 1\times10^{9}$	$\geq 1\times10^{6}$
Zr-95	$\geq 4\times10^{13}$	$\geq 4\times10^{11}$	$\geq 4\times10^{10}$	$\geq 4\times10^{8}$	$\geq 1\times10^{6}$

注：1.Am-241用于固定式烟雾报警器时的豁免值为1×10^5 Bq。

2.核素份额不明的混合源，按其危险度最大的核素分类，其总活度视为该核素的活度。

三、非密封源分类

上述放射源分类原则对非密封源适用。

非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量分为甲、乙、丙三级，具体分级标准见《电离辐射防护与辐射源安全标准》(GB 18871—2002)。

甲级非密封源工作场所的安全管理参照Ⅰ类放射源。

乙级和丙级非密封源工作场所的安全管理参照Ⅱ、Ⅲ类放射源。

附录B

国家环境保护总局辐射事故应急预案

一、总 则

（一）编制目的

作为国家辐射安全监管和环境保护部门，为做好辐射事故应急准备与响应工作，确保在辐射事故时，能准确地掌握情况、分析评价并决策，按事故等级及时采取必要和适当的响应行动，特制定本预案。

（二）编制依据

国家相关法律法规和《国家突发环境事件应急预案》。

（三）应急原则

以人为本，预防为主；统一领导，分类管理；属地为主，分级响应；专兼结合，充分利用现有资源。

（四）应急任务

1. 国家环保总局承担的应急任务

(1)制定总局辐射事故应急预案；

(2)负责特别重大辐射事故的处理和协调跨省区域辐射事故的处理；

(3)接收省级环保部门和辐射事故责任单位有关事故信息的报告，指导和组织力量支持省级环保部门开展辐射环境应急监测和应急行动；

(4)监督与评价由总局颁发辐射安全许可证的辐射事故责任单位的应急行动和事故处理措施；

(5)及时向国务院报告，并负责发布辐射事故的新闻和信息。

2. 省级环保部门承担的应急任务

负责辖区内重大、较大和一般辐射事故应急响应、事故处理及事故原因调查工作，协助总局做好特别重大辐射事故的处理工作。

(五)适用范围

辐射事故主要指除核设施事故以外，放射性物质丢失、被盗、失控，或者放射性物质造成人员受到意外的异常照射或环境放射性污染的事件。

主要包括：

(1)放射源丢失、被盗、失控等核技术利用中发生的辐射事故；

(2)铀(钍)矿冶及伴生矿开发利用中发生的放射性污染事故；

(3)放射性物质(除易裂变核材料外)运输中发生的事故；

(4)国外航天器在我国境内坠落造成环境放射性污染的事故。

二、总局辐射事故应急组织与职责

国家环保总局辐射事故应急组织体系是国家环保总局突发环境事件应急体系的组成部分。在总局环境应急指挥领导小组的统一指挥下，各职能部门及有关单位各司其职，平时做好辐射事故应急准备，辐射事故发生时快速而适当地进行响应。

(一)总局辐射事故应急组织体系

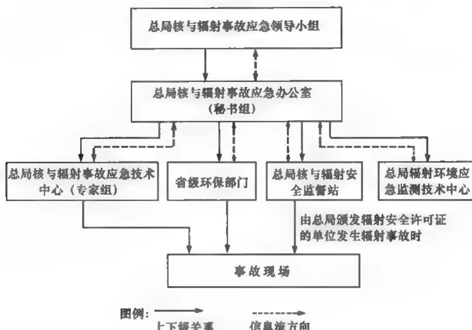
国家环保总局环境应急指挥领导小组在辐射事故时即为总局核与辐射事故应急领导小组，下设核与辐射事故应急办公室。辐射事故应急期间，总局核与辐射安全中心和总局辐射环境监测技术中心分别为总局核与辐射事故应急技术中心和总局辐射环境应急监测技术中心。总局辐射事故应急组织体系如图B-1 所示。

(二)总局核与辐射事故应急领导小组的组成与职责

1. 人员组成

总局核与辐射事故应急领导小组同总局环境应急指挥领导小组成员基本一致。在辐射事故应急期间，总局局长任核与辐射事故应急总指挥，总局主管核与辐射安全监管副局长(兼国家核安全局局长)任常务副总指挥，并作为总指挥替代人；总局办公厅主任、核安全司司长任副总指挥，办公厅主管总值班室副主任、核安全司主管应急副司长分别作为其替代人；总局规划司、国际司、宣教司等有关司办和直属单位主要负责人作为成员。辐射事故应急期间，总局

核与辐射事故应急领导小组的主要活动在总局机关大楼内进行。



图B-1 总局辐射事故应急组织体系

2. 主要职责

(1)审批总局辐射事故应急预案；

(2)决定总局辐射事故应急的启动和终止；

(3)指挥和协调总局辐射事故应急组织体系中各部门的应急准备和响应行动，指导或指挥省级环保部门的辐射事故应急工作；

(4)组织对由总局颁发辐射安全许可证的辐射事故责任单位的应急行动和事故处理措施进行监督和评价；

(5)审定向国务院提交的重大和特别重大辐射事故报告；

(6)负责发布辐射事故的新闻和信息。

(三)总局核与辐射事故应急办公室的组成与职责

1. 人员组成

总局核与辐射事故应急办公室是总局核与辐射事故应急领导小组在辐射事故应急期间的秘书机构和执行机构，由核安全司、办公厅、国际司、宣教司的相关人员组成，下设秘书组。核安全司司长任核与辐射事故应急办公室主任，

核安全司主管应急副司长(主任第一替代人)和其他副司长、办公厅主管总值班室副主任、总局核与辐射安全中心主任任办公室副主任。

秘书组由办公厅总值班室、国际司核安全处、宣教司新闻处以及核安全司放射源处、放射性废物管理处、核燃料处、综合处等相关人员组成。事故期间，组长由核安全司归口负责的项目处处长担任。辐射事故应急期间，总局核与辐射事故应急办公室设在总局机关大楼内。平时，总局核与辐射事故应急办公室成员按各自职责在本部门办公。

2. 主要职责

(1)组织制定总局辐射事故应急预案及实施程序；

(2)负责总局系统内部的辐射事故应急准备日常工作，监督检查全国环保系统内的辐射事故应急准备工作；

(3)负责受理来自地方环保部门上报的辐射事故报告、中央或国务院办公厅下达的辐射事故应急指示和总局领导的批示指令；

(4)具体指挥和综合协调总局系统内各辐射事故应急响应单位的启动和行动配合；

(5)负责与有关部、委和单位的联络与信息交换工作；

(6)发生重大和特别重大辐射事故时，及时起草向国务院提交的事故报告；

(7)组织开展对由总局颁发辐射安全许可证的辐射事故责任单位采取的应急行动和事故处理措施的跟踪、评价及监督，必要时，经总局核与辐射事故应急领导小组批准后，采取干预行动；

(8)组织起草有关辐射事故的新闻和信息。

(四) 总局核与辐射事故应急技术中心的组成和职责

1. 人员组成

辐射事故应急时，由核安全司司长任总局核与辐射事故应急技术中心主任，总局核与辐射安全中心主任任常务副主任，核安全司主管应急副司长(任主任第一替代人)、其他副司长以及核与辐射安全中心主管应急副主任任副主任。常务副主任全面负责总局核与辐射事故应急技术中心的应急准备日常工作。

总局核与辐射事故应急技术中心下设技术专家组，由总局核与辐射安全中心和其他相关单位的人员组成。

2. 主要职责

(1)制定总局核与辐射事故应急技术中心的辐射事故预案及实施程序,并报总局审批,协助总局辐射事故应急预案及实施程序的编制工作;

(2)为总局核与辐射事故应急领导小组决策提供技术支持,为全国环保系统开展辐射事故应急准备和响应提供技术支持;

(3)负责总局核与辐射事故应急技术中心的辐射事故应急准备日常工作,确保各类应急设施和设备的可靠运行;

(4)对辐射事故进行后果分析与评价,为总局核与辐射事故应急办公室制定应急响应措施提出建议;必要时,派出专家组参加辐射事故的现场监督、辐射环境应急监测、现场的应急响应与事故处理。

(五)总局核与辐射安全监督站职责

(1)制定管辖范围内的辐射事故应急预案及实施程序,并报总局审批;

(2)负责管辖范围内辐射事故应急准备日常工作;

(3)负责对总局颁发辐射安全许可证单位应急准备情况进行日常监督;

(4)负责对总局颁发辐射安全许可证单位的事故应急行动和事故处理情况进行监督,及时向总局报告情况。

(六)总局辐射环境应急监测技术中心的组成与职责

1. 人员组成

辐射事故应急时,由核安全司司长任总局辐射环境应急监测技术中心主任,总局辐射环境监测技术中心主任任常务副主任,核安全司主管应急副司长(担任主任第一替代人)、其他副司长以及总局辐射环境监测技术中心主管监测副主任任副主任。常务副主任全面负责总局核与辐射应急监测技术中心的应急准备日常工作。

2. 主要职责

(1)制定总局辐射环境应急监测技术中心的辐射事故应急预案及实施程序,并报总局审批;

(2)为总局核与辐射事故应急领导小组决策提供技术支持,为全国环保系统开展辐射环境应急监测提供技术支持;

(3)负责总局辐射环境应急监测技术中心辐射事故应急准备日常工作;

(4)根据总局核与辐射事故应急办公室的指令,对事故发生地的省级环保

部门提供辐射环境应急监测技术支援，承担特别重大辐射事故的辐射环境应急监测技术工作。

(七)省级环保部门职责

(1)组织制定省级环保部门的辐射事故应急预案及实施程序，并报总局备案；

(2)负责省级环保部门的辐射事故应急准备日常工作；

(3)负责向总局报告辖区内发生的辐射事故；

(4)负责辖区内重大、较大和一般辐射事故应急响应、事故处理及事故原因的调查工作；

(5)协助总局做好特别重大辐射事故的处理工作。

三、辐射事故分级

根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故4个等级。

(一)特别重大辐射事故(Ⅰ级)

凡符合下列情形之一的，为特别重大辐射事故：

(1)Ⅰ、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控并造成大范围严重辐射污染后果；

(2)放射性同位素和射线装置失控导致3 人以上(含3 人)急性死亡；

(3)放射性物质泄漏，造成大范围(江河流域、水源等)放射性污染事故；

(4)国外航天器在我国境内坠落造成环境放射性污染的事故。

(二) 重大辐射事故(Ⅱ级)

凡符合下列情形之一的，为重大辐射事故：

(1)Ⅰ、Ⅱ类放射源丢失、被盗或失控；

(2)放射性同位素和射线装置失控导致2 人以下(含2 人)急性死亡或者10人以上(含10 人)急性重度放射病、局部器官残疾；

(3)放射性物质泄漏，造成局部环境放射性污染事故。

(三)较大辐射事故(Ⅲ级)

凡符合下列情形之一的，为较大辐射事故：

(1)Ⅲ类放射源丢失、被盗或失控；

(2)放射性同位素和射线装置失控导致9人以下(含9人)急性重度放射病、局部器官残疾；

(3)铀(钍)矿尾矿库垮坝事故。

(四)一般辐射事故(Ⅳ级)

凡符合下列情形之一的，为一般辐射事故：

(1)IV、V 类放射源丢失、被盗或失控；

(2)放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射；

(3)铀(钍)矿、伴生矿严重超标排放，造成环境放射性污染事故。

四、应急行动

(一)启动

辐射事故应急响应坚持属地为主的原则。特别重大辐射事故的应急响应由总局组织实施。重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故的应急响应由省级环保部门全面负责。环保系统的辐射事故应急响应体系原则上按表B-1进行启动。

表B-1 辐射事故应急状态下总局系统应急组织的启动

应急状态	应急领导小组	核与辐射事故应急办公室		核与辐射事故应急技术中心	辐射环境应急监测技术中心	核与辐射安全监督站	省级环保部门及辐射环境监测机构
		主任/副主任	秘书组				
一般事故						✓	✓
较大事故						✓	✓
重大事故	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
特大事故	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(二)联络与信息交换

总局核与辐射事故应急办公室按照相关实施程序负责与总局核与辐射事故应急组织体系、国务院、国家核应急协调委、其他部(委)和单位、省级环保部门及辐射事故单位的联络与信息交换工作。辐射事故单位应按照事故报告制度向总局核与辐射事故应急办公室提交事故报告。

应急期间联络原则是：

(1)各岗位任务明确、尽职尽责，联络渠道明确、固定；

(2)联络用语规范，严格执行记录制度；

(3)对外渠道和口径统一。

(三)指挥和协调

特别重大辐射事故应急响应时，总局核与辐射事故应急办公室负责指挥总局辐射事故应急组织体系中各部门辐射事故应急行动，综合协调总局辐射事故应急组织体系与其他相关部门、单位的接口与行动。主要内容有：

(1)提出现场应急行动原则要求；

(2)派出有关专家参与现场应急指挥部的指挥工作；

(3)协调各级、各专业力量实施应急支援行动；

(4)协调受威胁的周边地区危险源的监控工作；

(5)协调建立现场警戒区和交通管制区域，确定重点防护区域；

(6)根据现场监测结果，确定被转移、疏散群众的返回时间；

(7)及时向国务院报告应急行动的进展情况。

省级环保部门对辐射事故的应急响应，参照总局辐射事故应急预案及实施程序，进行积极配合。

(四)应急监测

省级环保部门负责组织辐射事故现场的应急监测工作，确定污染范围，提供监测数据，为辐射事故应急决策提供依据。必要时国家环保总局指派总局辐射环境应急监测技术中心对事故发生地的省级环保部门提供辐射环境应急监测技术支援，或组织力量直接负责辐射事故的辐射环境应急监测工作。

(五)安全防护

现场应急工作人员应根据不同类型辐射事故的特点，配备相应的专业防护装备，采取安全防护措施。

各级环保部门负责现场公众的安全防护工作，根据事故特点开展相关工作：

(1)根据辐射事故的性质与特点，向本级政府提出公众安全防护措施；

(2)根据事发时当地的气象、地理环境、人员密集度等，确定公众疏散的方式，协助有关部门组织群众安全疏散撤离；

(3)在事发地安全边界以外,协助有关部门设立紧急避难场所。

五、应急终止和恢复

(一)应急终止条件

符合下列条件之一的,即满足应急终止条件:

(1)辐射污染源的泄漏或释放已降至规定限值以内;

(2)事故所造成的危害已经被彻底消除,无继发可能;

(3)事故现场的各种专业应急处置行动已无继续的必要。

(二)应急终止后的行动

应急终止后,总局核与辐射事故应急技术中心、核与辐射安全监督站、辐射环境应急监测技术中心和省级环保部门还应执行下列行动:

(1)评价所有的应急工作日志、记录、书面信息等;

(2)评价造成应急状态的事故,指导有关部门和事故责任单位查出原因,防止类似事故的重复出现;

(3)评价应急期间所采取的一切行动;

(4)根据实践经验,及时对应急预案及相关实施程序进行修订;

(5)对造成环境污染的辐射事故,总局和省级环保部门要组织有计划的辐射环境监测,审批、管理必要的区域去污计划和因事故及去污产生的放射性废物的处理和处置计划并监督实施。

(三)总结报告

应急终止后,总局核与辐射事故应急技术中心、核与辐射安全监督站、辐射环境应急监测技术中心和省级环保部门应在两周内向总局核与辐射事故应急办公室提交本部门的总结报告, 总局核与辐射事故应急办公室负责汇总和总结总局系统的应急响应情况,并在事故后1个月内向总局核与辐射事故应急领导小组提交总结报告。

六、应急保障

(一)应急资金

根据辐射事故应急准备与响应的需要,各级辐射应急组织提出项目支出预算报相关财政部门审批后执行, 以确保日常应急准备与应急响应期间的资金需要。

(二)应急设施设备

根据本预案规定的职责各级辐射应急组织应配备一定的应急设施设备，主要包括通信设备、交通工具、辐射监测设备、辐射评价软件、个人防护用品及文件资料等。

(三)应急能力维持

为保证辐射事故应急能力，各级辐射事故应急组织应：

(1)按照本预案的要求做好日常应急准备工作；

(2)负责制定本部门辐射事故应急人员的应急培训和应急演习计划，并组织实施；

(3)积极开展辐射事故应急准备、应急响应及应急监测技术的研究与开发工作。

七、附则

本预案由总局核与辐射事故应急领导小组批准，总局核与辐射事故应急办公室负责解释，自批准之日起执行。

本预案每两年修订一次，总局核与辐射事故应急办公室组织修订工作并报总局核与辐射事故应急领导小组审批；实施程序由总局核与辐射事故应急办公室负责修订并发布实施。

参考文献

[1]卢希庭.原子核物理[M].修订版.北京:原子能出版社,2002.
[2]梅镇岳. 原子核物理学[M].3 版.北京:科学出版社,1983.
[3]徐四大. 核物理学[M].北京:清华大学出版社,1992.
[4]杨福家.原子物理学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2000.
[5]蒋明. 原子核物理导论[M]. 北京:原子能出版社,1983.
[6]于孝忠.核辐射物理学[M]. 北京:原子能出版社,1986.
[7]卢玉楷.简明放射性同位素应用手册[M].上海:上海科学普及出版社,2004.
[8]王汝赡,卓韵裳.辐射测量与防护[M]. 北京:原子能出版社,1990.
[9]肖伦.放射性同位素技术[M]. 北京:原子能出版社,2005.
[10]马崇智. 放射性同位素手册[M]. 北京:科学出版社,1977.
[11]郑成法.核化学及核技术应用[M]. 北京:原子能出版社,1990.
[12]李承华.辐射技术基础[M]. 北京:原子能出版社,1988.
[13]孙树正.放射源的制备及应用[M]. 北京:原子能出版社,1992.
[14]孙和琴.用辐射不育法灭害虫[M]. 北京:原子能出版社,1988.
[15]陈其勋.中国食品辐照进展[M]. 北京:原子能出版社,1998.
[16]王汀华.水稻辐射育种[M]. 北京:原子能出版社,1997.
[17]顾光伟.农业应用核技术[M]. 北京:原子能出版社,1992.
[18]范我.核医学[M]. 北京:原子能出版社,1995.
[19]刘克良.放射损伤及防护[M]. 北京:原子能出版社,1995.
[20]莱善钰.放射性同位素生产与应用现状及其发展趋向[J].同位素,1999,12(1):49.
[21]祝霖,刘伯里.放射化学[M]. 北京:原子能出版社,1985.214-217.

[22]李星洪.辐射防护基础[M]. 北京:原子能出版社,1982.
[23]李德平.辐射防护手册第二分册:辐射防护检测技术[M]. 北京:原子能出版社,1988.
[24]孙世荃.人类辐射危害评价[M]. 北京:原子能出版社,1996.
[25]田志恒.辐射剂量学[M]. 北京:原子能出版社,1992.
[26]李士俊.电离辐射剂量学[M]. 北京:原子能出版社,1981.
[27]李德平.辐射防护手册第三分册:辐射安全[M]. 北京:原子能出版社,1990.
[28]李德平.辐射防护手册第五分册:辐射危害与医学监督[M]. 北京:原子能出版社,1991.
[29]方杰.辐射防护导论[M]. 北京:原子能出版社,1991.
[30]连培生.原子能工业[M]. 北京:原子能出版社,2002.
[31]夏寿萱.分子放射生物学[M]. 北京:原子能出版社,1992.
[32]杜圣华.核电站[M]. 北京:原子能出版社,1982.
[33]阮可强.核临界安全[M]. 北京:原子能出版社,2001.
[34]郭星渠.核能:20 世纪后的主要能源[M]. 北京:原子能出版社,1987.
[35]谢仲生.21 世纪核能——先进核反应堆[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
[36]高同泰.放射性物质的安全管理[M]. 北京:原子能出版社,1993.
[37]王吉欣,卢玉楷.放射药物学[M].北京:原子能出版社,1999.
[38]王成孝.核能与核技术应用[M]. 北京:原子能出版社,2002.
[39]王世真.分子核医学[M].北京:中国协和医科大学出版社,2001.
[40]王世真.核医学与核生物学[M]. 北京:科学出版社,1990.
[41]肖啸菴.同位素分离[M]. 北京:原子能出版社,1999.
[42]张焕乔. 原子核物理的新发展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2003,(S1).
[43]Marmier P, Sheldon E. Physics of Nuclei and Particles[M]. New York and London: Academic Press Inc,1969.
[44]Krane K S.Introductory Nuclear Physics[M]. New York:John Wiley &Sons, 1987.

[45]Glenn F Knoll.Radiation Detection and Measurement[M].Third Edition.New York: John Wiley &Sons,2000.

[46]Baykal A, Rosen D, Zhou C, et al. Telomerase in breast cancer: A critical evaluation[J].AdvAnat Pathol,2004,11(5):262-268.

[47]Hiyama E,Hiyarna K. Telomerase detection in the diagnosis and prognosis of cancer[J].Cytotechndigy,2004,45(1-2):61-74 .

[48]于敏.中国军用放射性核素衰变纲图[M].北京:原子能出版社,2001.

[49]Carbol P,Solatie D, Erdmann N,et al. Deposition and Distribution of Chernobyl Fallout Fission Products Actinides in a Russian Soil Profile [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2003,(68):27-46.

[50]核素图表编制组.核素常用数据表[M].北京:原子能出版社,1977.

[51]刘运祚.常用放射性核素衰变纲图[M].北京:原子能出版社,1982.

[52]朱瑞森,路汉魁.放射性核素治疗[M].上海:上海科学技术出版社,2004.

[53]刁国平.放射性同位素的应用[M].北京:人民出版社,1975.

[54]谢复成.放射性同位素的应用卫生防护[M].长沙:湖南科学技术出版社,1990.

[55]胡立宽.放射治疗技术学[M].北京:人民军医出版社,2006.